

REGULACIÓN DE TENSIÓN PARA UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA BASADO EN LÓGICA DIFUSA

Luis Eduardo Martinez Ordoñez

Trabajo de grado presentado como requisito

Parcial para optar al título de

Ingeniero Electricista

Pereira, Junio del 2016

Universidad Tecnológica de Pereira

Programa de ingeniería eléctrica



Regulación de tensión para un sistema de distribución con generación distribuida basado en lógica difusa.

Luis Eduardo Martinez Ordoñez

Director: Ph.D Eduardo Giraldo Suárez

Pereira, Junio del 2016

Programa de Ingeniería Eléctrica

Universidad Tecnológica de Pereira

La Julita Pereira (Colombia)

TEL (+57) (6) 3137122

www..utp.edu.co

Agradecimientos

Inicialmente, los agradecimientos son para Dios por habernos guiado de la mejor manera posible a pesar de las adversidades que se nos presentaron a lo largo de la carrera, ayudándonos a resolverlas con sabiduría e inteligencia.

De igual forma quiero agradecerles a mis padres de familia, en especial a mi madre, que aunque no estas presente en este mundo, siempre fuiste mi motivación para seguir adelante, este no es solo un trabajo mío, es nuestro, esto es por ti. Gracias por haberme alentado siempre a seguir adelante a pesar de las adversidades, espero que desde donde estés, te sientas orgulloso de mí.

A nuestro director de trabajo de grado el ingeniero Eduardo Giraldo por abrirnos un espacio en su tiempo y de esta manera guiarnos por el camino correcto para realizar el proyecto de grado, además de su paciencia y disposición en los momentos que lo necesitamos.

Resumen

Con esta investigación se espera encontrar un tipo de control de regulación de voltaje que se pueda aplicar de una manera eficiente en las Micro redes compuestas por generadores distribuidos, en donde la Micro red se pueda conectar y desconectar de la red principal y no se vea afectado el nivel de tensión, para esto se implementa un tipo de control difuso, se mostrara sus resultados y será comparado con el control PI tradicional.

Tabla de contenidos

1.1	Introducción.....	8
1.2	Planteamiento del problema.....	9
1.3	Justificación.....	10
1.4	Objetivos	
	Objetivo general.....	10
	Objetivo específicos.....	10
2	Modelo de la turbina eólica.....	13
	2.1 Componentes de la turbina eólica.....	13
	2.2 Modelo mecánico de la turbina.....	16
	2.3 Velocidad del viento.....	19
3.	Estudio y modelado del generador de inducción.....	23
	3.1 Aspectos constructivos.....	23
	3.1.1 Par inducido en un motor de inducción.....	24
	3.1.2 Deslizamiento del rotor.....	26
	3.1.3 Circuito equivalente del motor de inducción.....	27
	3.2 Generador de inducción.....	28
	3.2.1 Modelo del SCIG.....	29
4.	Descripción del convertido Boost.....	36
5.	Estudio y modelado del panel fotovoltaico.....	42
	5.1 Descripción de un sistema fotovoltaico autónomo.....	42
	5.2 Modelado matemático de un panel fotovoltaico.....	43
6.	Controlador difuso.....	46
7.	Resultados y análisis.....	49
	7.1 Simulación.....	49
	7.2 Resultados.....	52
8.	Conclusiones.....	52
	8.1 Conclusiones.....	55
	8.2 Recomendaciones.....	57

Lista de figuras

Figura 2.1 Componentes de una turbina eólica.....	13
Figura 2.2 Variación del coeficiente de potencia C_p	17
Figura 2.3 Características de seguimiento de la turbina.....	18
Figura 2.4 Ley exponencial de Hellmann.....	20
Figura 2.5 Aprovechamiento del viento	22
Figura 3.1 Máquina de inducción	24
Figura 3.2 Par de inducción.....	25
Figura 3.3 Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.....	28
Figura 3.4 Par-velocidad de una máquina de inducción.....	29
Figura 3.5 Ejes de transformación dq.....	31
Figura 3.6 Modelo del generador de inducción en el eje dq.....	33
Figura 4.1 Circuito que describe el convertidor Boost.....	36
Figura 4.2 Circuito equivalente con el transistor encendido.....	37
Figura 4.3 Circuito equivalente con el transistor apagado.....	38
Figura 4.4 Corrientes en el inductor, diodo y condensador.....	39
Figura 5.1 Esquema para la producción de energía.....	43
Figura 5.2 Circuito equivalente de un panel fotovoltaico.....	42
Figura 6.1 Arquitectura típica de un control difuso.....	46
Figura 7.1 Generador eólico implementado.....	49
Figura 7.2 Modelo matemático implementado para un panel fotovoltaico.....	50
Figura 7.3 Modelo donde se realizaron las pruebas.....	51
Figura 7.4 Control difuso con carga de 50kw.....	52
Figura 7.5 Momento en que entra la primera carga de 50 kW con difuso.....	52
Figura 7.6 Momento en que entra la primera carga de 50 kW con PI.....	52
Figura 7.7 Momento en que entra la segunda carga de 50 kW con difuso.....	53
Figura 7.8 Momento en que entra la segunda carga de 50 kW con PI.....	53
Figura 7.9 Momento en que se desconecta la carga de 50 kW con difuso.....	53

Lista de tablas

Tabla 2.1 Valores de la exponente de Hellmann	20
Tabla 3.1 Sistema de referencia.....	32
Tabla 5.1 Valores de A dependiendo la tecnología del panel.....	45

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUCCIÓN

La regulación de voltaje en los sistemas de potencia y en las redes de distribución tanto en alta como en baja tensión es una tarea que se realiza a diario para una operación normal y sin interrupciones del servicio al usuario, ahora con la implementación de los generadores distribuidos que están siendo ubicados en puntos cercanos al usuario, en muchos casos, ubicados para el abastecimiento del mismo usuario y con la posibilidad de entregar potencia a la red de distribución, la regulación de voltaje se convierte en el principal punto de investigación para una efectiva operación con estos generadores, por eso esta investigación resulta importante, dado que la regulación de tensión se convertirá en un problema más complejo con la integración de estos tipos de generadores.

Con la introducción de los generadores distribuidos (DGs) las micro redes han cambiado su estructura de única fuente y el modo de operación radial de los sistemas de distribución, además el impacto de estos puede ser analizado desde muchos aspectos. Desde las características de salida de los DGs dependiendo de su posición en la red de distribución y el modo de operación.

La regulación de tensión secundaria en una red inteligente es el proceso que se lleva a cabo de acuerdo al comportamiento de los generadores distribuidos (DG), las cuales pueden ser eólica o fotovoltaica, dicho regulador debe asegurarse de mantener el voltaje dentro de un rango admisible, para así garantizar el funcionamiento normal del DG. Ya que por su forma de operación intermitente hace que estos DGs no estén inyectando potencia al sistema de forma constante, además en estos DGs en algún momento deben desconectarse de la red debido a alguna perturbación dentro del DG, realizar algún tipo de mantenimiento, o simplemente no este inyectando potencia a la red.

Tradicionalmente la regulación de tensión ya sea para alta o para baja tensión normalmente se realiza con la variación del tap, convirtiéndose así en un tipo de control on-off muy simple, donde el tap se modifica estando bajo carga para poder mantener el nivel de tensión dentro de un rango establecido, haciendo que este sujeto a posibles problemas en la inestabilidad del sistema de potencia por la inesperada variación de la carga.

En los últimos años con el incremento de los generadores distribuidos conectados a la red de distribución y los muchos beneficios que traen consigo como la reducción de pérdidas en el sistema, el incremento de la confiabilidad, compensación de potencia activa, beneficios ambientales y beneficios económicos entre otros, son las principales motivaciones para realizar esta investigación.

Implementar este tipo de control impone un gran reto tanto para el sistema de distribución actual como para los profesionales en esta área, ya que, la implementación de los generadores distribuidos no solo se va hacer a pequeña escala en donde su impacto a la red de distribución actual sea despreciable, si no, como es tendencia la instalación de estos generadores en todo el mundo con redes de distribución conectadas entre sí.

Con esta investigación se espera encontrar un tipo de control de regulación de voltaje que se pueda aplicar de una manera eficiente en las Micro redes compuestas por generadores distribuidos, en donde la Micro red se pueda conectar y desconectar de la red principal y no se vea afectado el nivel de tensión.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El sistema de energía eléctrica está experimentando una rápida transformación a una red eléctrica inteligente, la llamada Smartgrid. Microgrid, como los bloques de construcción de las redes inteligentes, son sistemas de energía a pequeña escala que faciliten la integración efectiva de los generadores distribuidos (DG). El control apropiado de una microgrid es un requisito previo para las operaciones estables y económicamente eficientes de las redes inteligentes. Una Microgrid pueden operar en ambos modos de conexión, conectada a la red y en modo de operación en isla.

Controles secundarios convencionales de microgrid asumen una estructura de control centralizado que requiere una red de comunicación compleja, en algunos casos, con enlaces de comunicación de dos vías. Esto puede afectar negativamente a la fiabilidad del sistema. Por otra parte, las estructuras de control distribuido de cooperación, con una red de comunicación escasa, son alternativas adecuadas para el control secundario de microgrids. Control cooperativo distribuido se introdujo recientemente en los sistemas de energía, para regular la potencia de salida de múltiples generadores fotovoltaicos.

En las últimas dos décadas, los elementos de sistema han ganado mucha atención debido a su flexibilidad y eficiencia computacional. Estos sistemas se inspiran en los fenómenos naturales tales como un enjambre de insectos, reuniéndose en las aves, las leyes de la termodinámica, y de sincronización y transiciones de fase en los sistemas físicos y químicos. En estos fenómenos, el proceso de coordinación y sincronización requiere que cada elemento de intercambio de información con otros elementos según algunos protocolos de comunicación restringidas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El control del voltaje en valor nominal es una tarea diaria en la operación del sistema de potencia por esto ha sido objeto de estudio por muchos años. Debido a que se ha estudiado muy poco el control cooperativo para la regulación del voltaje.

Resulta importante realizar esta investigación ya que el sistema de potencia está sujeto a pequeñas variaciones o perturbaciones en todo momento, lo que puede ocasionar que el voltaje se desvíe de su valor nominal. Con esta investigación se espera encontrar como el control cooperativo distribuido funciona en un sistema de potencia y como se puede lograr la operación eficiente del sistema.

1.4 OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar un sistema de control cooperativo basado en lógica difusa para la regulación de tensión.

Objetivos Específicos

- Modelar el sistema a controlar que incluya paneles fotovoltaicos y generación eólica.
- Diseñar un controlador para la regulación de voltaje basado en lógica difusa.
- Realizar pruebas con el sistema modelado y compararlo con un controlador PI.

1.5 ESTADO DE ARTE

Los sistemas de potencia están experimentando una rápida transformación a las redes inteligentes, normalmente llamadas SmartGrid, compuestas por pequeñas unidades generadores o generadores distribuidos (DG), las cuales están conectadas a través de todo el sistema de distribución, una Micro red como un sistema de potencia a pequeña escala, compuesta por DGs (pueden ser: generadores eólicos, fotovoltaicos, generadores diésel entre otros), facilita la efectiva integración de los DGs, por lo cual proponer un sistema de control secundario en una Micro red es un prerequisite fundamental para una estable, económica y efectiva operación de la red inteligente [2].

Convencionalmente, la estructura de control de una Micro red, tiene una estructura de control centralizada que requiere una compleja red de comunicación, en algunos casos con dos enlaces de comunicación [2]. Muchos esquemas de control para la regulación de voltaje han sido propuestos, utilizando diferentes técnicas de control, algunos basados en control cooperativo, otros basados en algoritmos difusos en tiempo real, o técnicas poco comunes como la aplicación de un control adaptivo difuso o la aplicación de redes neuronales artificiales como lo proponen en [8]. En [2], en donde los autores presentan un esquema de control, basados en el control cooperativo distribuido usando una realimentación linealizada para transformar las dinámicas heterogéneas no lineales a dinámicas lineales, de esta forma el control de voltaje secundario es transformado a un problema de sincronización de seguimiento de segundo orden, además al ser un control cooperativo distribuido, hace que se requiera una red comunicación simple, en donde cada DG intercambia información con los elementos vecinos, haciendo de este un sistema más confiable. En [4], los autores presentan una propuesta para la regulación de voltaje basados en la lógica difusa, el cual puede ser visto como un simulador de la mente humana, ya que, operar y tomar decisiones con poca información del estado de la red o en cualquier estado en que se tenga información incompleta. Los dos principales aportes de [4] son, tratar de mitigar la interacción entre el cambiador del tap bajo carga y las unidades DG, también evitar los cortes innecesarios de potencia activa del DG. Además de este tipo controlador basado en lógica difusa, también se puede aplicar este tipo de controlador para regular el voltaje cambiando el ángulo de fase de un banco de tiristores como es propuesto en [1], haciendo así que se medique el flujo magnético de un compensador de voltaje esta 'tico, para obtener así la salida de voltaje regulada. Este método

funciona tomando una señal de referencia, la cual es comparada con la señal medida, obteniendo una señal de error y al mismo tiempo guarda esta señal de error para observar la forma en la que cambia este error, de este modo el controlador toma la decisión de control [1]. Tras investigaciones en los últimos años y una serie de pruebas con micro redes experimentales en donde han logrado incrementar unas 10 veces la potencia transmisible comparada con un sistema tradicional AC, además en [5], donde hacen referencia que un sistema DC puede ser combinado con un sistema AC sin necesidad de usar un inversor, como resultado la combinación de los dos tipos de sistemas, la energía convertida puede mejorar entre un 2.5% y 10%. Con la implementación de la red inteligente y la alta penetración de generadores eólicos con doble alimentación (DFIGs, Double Fed Wind Turbines) y con almacenadores de energía con superconductores magnéticos (SMES, Superconducting magnetic Energy Storage), los autores en [9], presentan un método con el cual pueden mantener.

estable el sistema dentro de un rango de valores permisibles, con la implementación de un control cooperativo, utilizándolo un control central de la micro red y un control local de la micro red, para lograr una fácil y estable transición de la micro red entre estar conectada a la red principal a modo de operación aislada y viceversa.

CAPÍTULO 2

2. MODELO DE LA TURBINA EÓLICA

Una turbina eólica es un dispositivo mecánico que convierte la energía del viento en electricidad. Las turbinas eólicas se diseñan para convertir la energía del movimiento del viento (energía cinética) en la energía mecánica, movimiento de un eje. Luego en los generadores de la turbina, ésta energía mecánica se convierte en electricidad.

Las turbinas eólicas se diseñan para trabajar dentro de ciertas velocidades del viento. La velocidad más baja, llamada velocidad de corte inferior que es generalmente de 4 a 5 m/s, pues por debajo de esta velocidad no hay suficiente energía como para superar las pérdidas del sistema. La velocidad de corte superior es determinada por la capacidad de una máquina en particular de soportar fuertes vientos. La velocidad nominal es la velocidad del viento a la cual una máquina particular alcanza su máxima potencia nominal. Por arriba de esta velocidad, se puede contar con mecanismos que mantengan la potencia de salida en un valor constante con el aumento de la velocidad del viento.

2.1 COMPONENTES DE LA TURBINA EÓLICA

Como se observa en la figura 2.1 se puede apreciar los componentes de la turbina eólica.

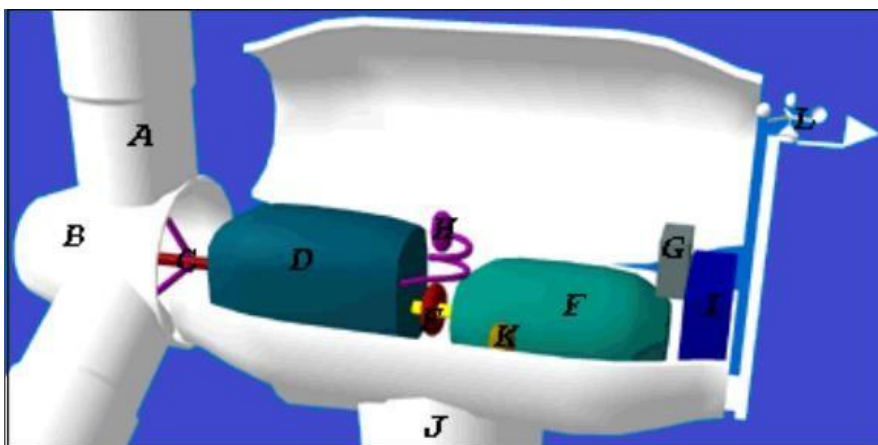


Figura 2.1 Componentes de una turbina eólica

- a. **Palas del Rotor:** Capturan el viento y transforman su poder al cubo del rotor. En una moderna turbina eólica de 600 kW cada pala del rotor mide aproximadamente 20 m de longitud y se diseña mucho como un ala de un aeroplano.
- b. **El Cubo del Rotor:** Esta adjunto al eje de baja velocidad de la turbina eólica.
- c. **El Eje de Baja Velocidad:** Conecta el cubo del rotor a la caja de engranajes. En una moderna turbina eólica de 600 kW el rotor rueda relativamente despacio, sobre 19 o 30 revoluciones por minuto. El eje contiene tubos para el sistema hidráulico permitiendo operar a los frenos aerodinámicos.
- d. **La Caja de Engranajes:** Tiene el eje baja velocidad a la izquierda. Esto hace que el eje de alta velocidad gire aproximadamente 50 veces más rápidamente que el eje de velocidad baja.
- e. **El Eje de Alta Velocidad:** Gira aproximadamente con 1500 revoluciones por minuto y maneja el generador eléctrico. Está provisto con un freno a disco emergencia. El freno mecánico se usan caso del fallo del freno aerodinámico, o cuando la turbina está reparándose.
- f. **El Generador Eléctrico:** Es normalmente un generador llamado de instalación o asíncrono. En una turbina eólica moderna la máxima potencia eléctrica normalmente esta entre 500 y 1500 kilovatios (kW).
- g. **El Controlador Electrónico:** Contiene una computadora que continuamente supervisa la condición de la turbina eólica y controla el mecanismo de orientación. En caso cualquier funcionamiento defectuoso, (ejemplo recalentamiento de la caja de engranajes o el generador), detiene la turbina y llama automáticamente a la computadora del operador de la turbina vía un nexo de modem de teléfono

- h. El Sistema Hidráulico:** Se usa para calibrar los frenos aerodinámicos de la turbina eólica.
- i. La Unidad de Enfriamiento:** Contiene un ventilador eléctrico que se usa para refrescar el generador eléctrico. Además, contiene una unidad de aceite refrescante que es usada para enfriar el aceite en la caja de engranajes. Algunas turbinas tienen generadores de agua fría.
- j. La Torre:** Generalmente, es una ventaja tener una torre alta, debido a que las velocidades de viento van aumentando cuanto más lejos del terreno se esté. Una típica moderna turbina de 600 kW tendrá una torre de 40 a 60 metros. Las torres pueden ser o torres tubulares o torres reticuladas. Las torres tubulares son más seguras para el personal que tiene que mantener las turbinas, mientras ellos pueden acostumbrarse a usar la escalera interior para conseguir llegar a la cima de la turbina. La ventaja de las torres reticuladas es principalmente que son más baratas.
- k. El Mecanismo de Orientación:** Usa motores eléctricos para volver la nacelle con el rotor contra el viento. Este mecanismo es operado por el controlador electrónico que siente la dirección de viento que usa la veleta. Normalmente, la turbina orientara solo unos pocos grados a la vez, cuando el viento cambia su dirección.
- l. El Anemómetro y la Vela de Viento:** Se usan para medir la velocidad y dirección del viento. Las señales electrónicas del anemómetro son usadas por el controlador electrónico de la turbina para comenzar la turbina eólica cuando la velocidad del viento alcanza aproximadamente 5 metros por segundo. Las computadoras paran automáticamente la turbina eólica si la velocidad del viento excede 25 metros por segundo, para proteger la turbina y sus alrededores. Las señales de la veleta de viento son usadas por el controlador electrónico de la turbina eólica para volver la turbina contra el viento, usando el mecanismo de orientación.

2.2 MODELO MECÁNICO DE LA TURBINA

De la expresión de energía cinética del flujo de aire, la potencia contenida en el viento que pasa por un área A con velocidad del viento v_1 [1]:

$$P_w = \frac{\rho}{2} A v_1^3 \quad (2.1)$$

Donde ρ es la masa específica del aire que depende de la presión del aire y de la humedad, se supone $\rho = 1,2 \frac{Kg}{m^3}$. Las corrientes de aire tienen dirección axial a través de la turbina eólica, de lo que A es el área de barrida circular. La potencia útil obtenida se expresa por medio del coeficiente de potencia C_p [1]:

$$P = C_p \frac{\rho}{2} A v_1^3 \quad (2.2)$$

Se han desarrollado aproximaciones numéricas para conocer el valor del coeficiente de potencia C_p [2]:

$$C_p = 0,22 \left(\frac{116}{\beta} - 0,4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\beta}} \quad (2.3)$$

Donde β se puede calcular [2]:

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,08\theta} - \frac{0,035}{\theta^3 + 1}} \quad (2.4)$$

Don λ y θ es la velocidad específica y el ángulo de paso, respectivamente, de la turbina eólica.

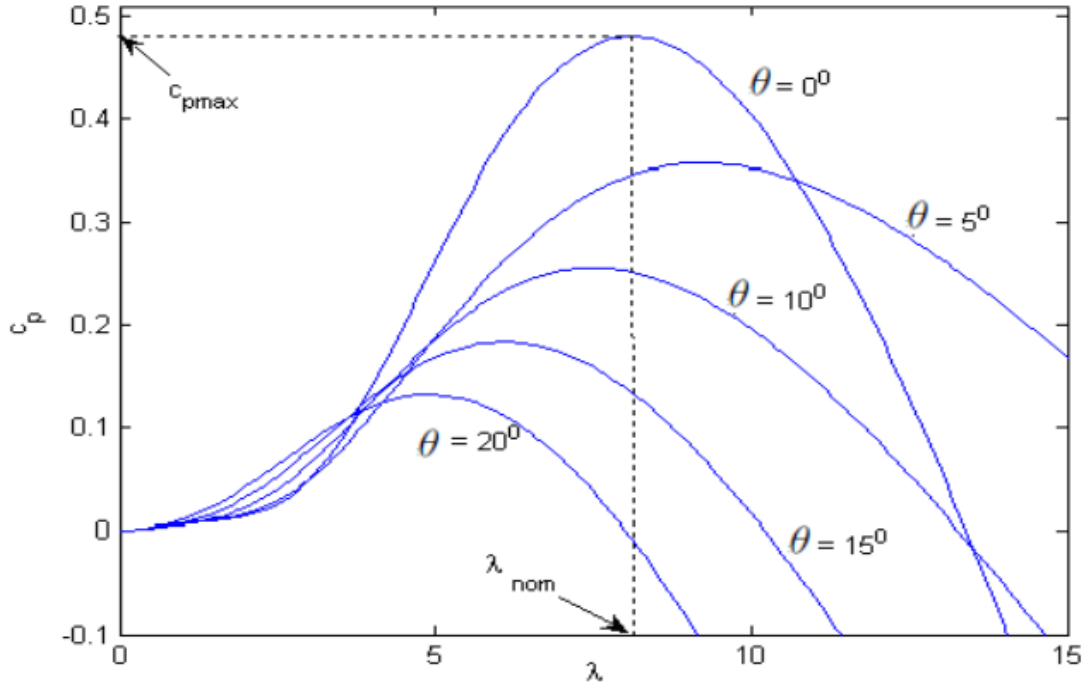


Figura 2.2 Variación del coeficiente de potencia C_p de la turbina eólica en función de λ y θ [3].

A medida que el ángulo de paso θ aumenta, el coeficiente de potencia disminuye como se muestra en la Figura 1.3 y en consecuencia afecta la potencia que la turbina eólica extrae del viento, de acuerdo a la siguiente ecuación [4]:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\theta, \beta) v_1^3 \quad (2.5)$$

Para conocer el torque entregado por la turbina eólica, se tiene la máxima potencia extraída del viento P_t y la velocidad angular de la turbina ω_t :

$$P_t = T_t \omega_t \quad (2.6)$$

$$\omega_t = \frac{\lambda v_1}{R} \quad (2.7)$$

Reemplazando la ecuación (1.7) en la ecuación (1.5) y luego despejando de (1.6), se obtiene la expresión del torque T [2]:

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v_1^3 C_t(\lambda, \beta) \quad (2.8)$$

Donde C_t se representa:

$$C_t = \frac{C_p(\theta, \beta)}{\lambda} \quad (2.9)$$

La energía generada a partir de la turbina depende del Coeficiente de Potencia. Para cada velocidad del viento, hay una velocidad de rotación de la turbina específica que genera la máxima potencia P_t . De esta manera, el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para cada velocidad del viento aumenta la generación de energía en la turbina. La curva del Coeficiente de Potencia con la curva MPPT se muestra en la figura 1.4, de la que puede verse que, para cualquier velocidad del viento en particular, hay una velocidad de rotación ω_r , que genera la potencia máxima extraída, P_t , llamado también como el poder óptimo, P_{opt} .

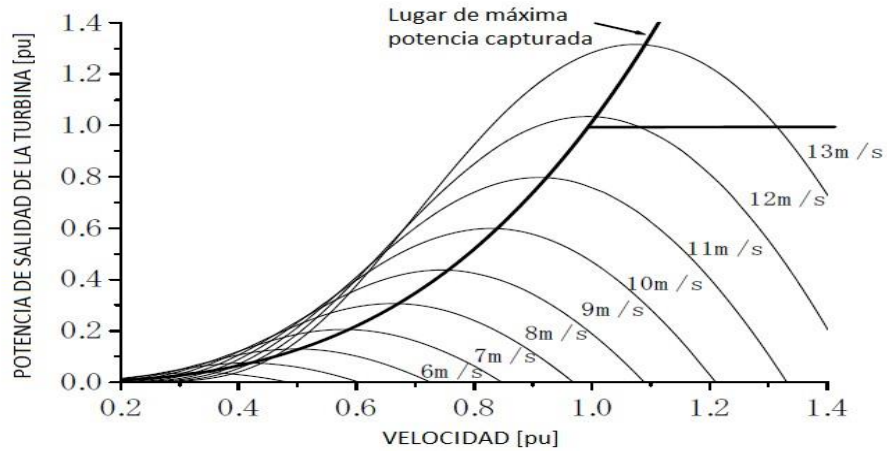


Figura 2.3 Característica de seguimiento de la turbina del punto de máxima potencia [5].

El tren de potencia o transmisión de los generadores eólicos consta de cinco partes, el rotor, el eje de baja velocidad, caja de cambios, eje de alta velocidad y el generador. En el análisis, las otras partes de las turbinas de viento, por ejemplo, la torre y los modos de flexión de las hélices pueden ser despreciados. Cuando el interés de estudio varía, la complejidad del tren de transmisión difiere. Por ejemplo, cuando se estudian los problemas tales como la fatiga de torsión, la dinámica de ambos lados de la caja de cambios tienen que ser considerados. Entonces, se requieren dos masas agrupadas o

modelos más sofisticados. Pero cuando el estudio se centra en la interacción entre los parques eólicos y las redes de CA del tren de transmisión puede ser tratada como un modelo de masa despreciable en aras de la eficiencia del tiempo y precisión adecuada. Por lo tanto, el tren de transmisión adopta la forma de un modelo de masa despreciable y se muestra en la figura 1.3 en el que los parámetros se han referenciado al del generador.

$$\frac{dw_g}{dt} = (T_e - T_{wg} - B_m w_g) \frac{1}{J_{eq}} \quad (2.10)$$

$$\frac{d\alpha_g}{dt} = w_g$$

Donde g representa los parámetros del lado del generador, J_{eq} es la inercia rotacional del generador la cual se deriva en $J_{eq} = \frac{J_g + J_w}{n_g}$, n_g es la relación de transmisión, B_m es la fricción de rotación. T_e es el torque electromagnético, α_g es el ángulo mecánico del generador, T_{wg} es el torque aerodinámico que se ha referido al lado del generador por medio de $T_{wg} = \frac{T_w}{n_g}$ y w_g es la velocidad angular mecánica.

2.3 VELOCIDAD DEL VIENTO

El viento viene definido por dos parámetros esenciales que son, su dirección y su velocidad. La dirección del viento y su valoración a lo largo del tiempo conducen a la ejecución de la llamada rosa de los vientos, La velocidad media del viento varía entre 3 y 7 m/s, según diversas situaciones meteorológicas; es elevada en las costas, más de 6 m/s, así como en algunos valles más o menos estrechos. En otras regiones es, en general, de 3 a 4 m/s, siendo bastante más elevada en las montañas, dependiendo de la altitud y de la topografía.

La velocidad media del viento es más débil durante la noche, variando muy poco, aumenta a partir de la salida del Sol y alcanza un máximo entre las 12 y 16 horas solares. La velocidad del viento se estudia a partir de la Ley exponencial de Hellmann. De acuerdo a esta Ley la

velocidad del viento varía con la altura, siguiendo aproximadamente una ecuación de tipo estadístico, conocida como Ecuación de Hellmann, de la forma [6].

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (2.11)$$

En la v_h es la velocidad del viento a la altura h , v_{10} es la velocidad del viento a 10 metros de altura, α es la exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, y cuyos valores vienen indicados en la tabla 1.1, en la figura 1.4 se indican las variaciones de la velocidad del viento con la altura según la ley exponencial de Hellmann [7].

Tabla 2.1 Valores de la exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno [7].

Tipo de terreno	Valor del exponente de Hellmann
Lugares llanos con hielo o hierba	$\alpha=0.08+0.12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha=0.14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha=0.13+0.16$
Zonas turísticas	$\alpha=0.2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha=0.2+0.26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha=0.25+0.4$

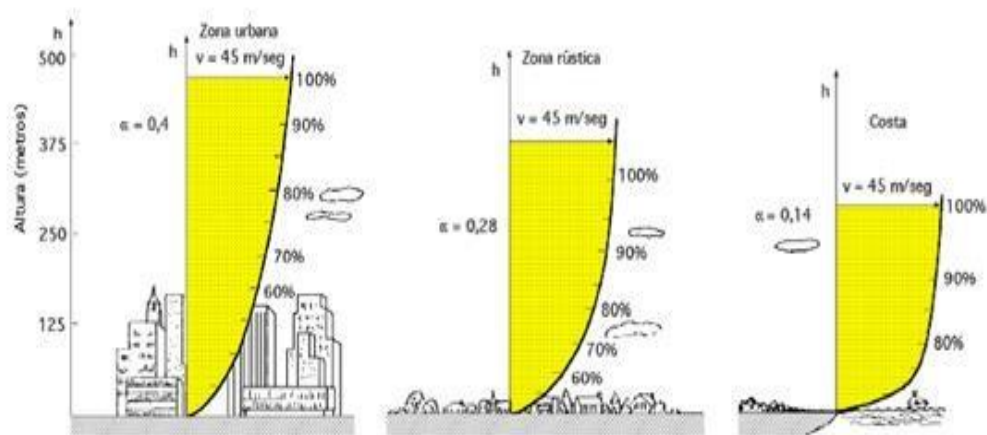


Figura 2.4 Ley exponencial de Hellmann.

Debido a que las máquinas eólicas arrancan para una determinada velocidad del viento, al tiempo que proporcionan la máxima potencia para unas velocidades iguales o superiores a una dada v_{nom} , es natural que los datos a utilizar sean las curvas de duración de velocidad que se

pueden convertir en curvas energéticas utilizando en el eje de ordenadas magnitudes $N = k \cdot v^3$ que proporcionan la potencia disponible en el viento para cada velocidad y de la que sólo es posible extraer una fracción.

La curva de duración de velocidad tiende a aplanarse cuando aumenta el tiempo durante el cual el viento persiste a una cierta velocidad. La velocidad media del viento es de la forma:

$$\hat{v} = \frac{1}{8760} \int_0^{8760} v dt \quad (2.12)$$

Y la intensidad energética del viento, definida como la relación entre la potencia y la superficie frontal (área barrida), es proporcional al cubo de la velocidad, en la forma:

$$\frac{N_{viento}}{A} = I_h = I_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^{3a} = I_{10} \left(\frac{V_h}{V_{10}} \right)^3 \quad (2.13)$$

En una máquina eólica se pueden considerar tres velocidades del viento características:

- La velocidad de conexión v , conexas la velocidad del viento por encima de la cual se genera energía. Por debajo de esta velocidad toda la energía extraída del viento se gastaría en pérdidas y no habría generación de energía.
- La velocidad nominal v_{nom} , es la velocidad del viento para la cual la máquina eólica alcanza su potencia nominal. Por encima de esta velocidad la potencia extraída del viento se puede mantener constante.
- La velocidad de desconexión v_{emb} , es la velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar, porque se embala; los sistemas de seguridad comienzan a actuar frenando la máquina, desconectándola de la red a la que alimenta.

Energía útil del viento: En una corriente de aire de densidad ρ y velocidad v , como se indica en la figura 1.4, la potencia eólica disponible que atraviesa una superficie A y hace un recorrido L en el tiempo t , viene dada por la expresión:

$$N_{viento} = \frac{E_{cinetica}}{t} = \frac{\frac{mv^2}{2}}{t} = \frac{v^2}{2t} (vtA\rho) = \frac{\rho Av^3}{2} = kv^3 \quad (2.14)$$

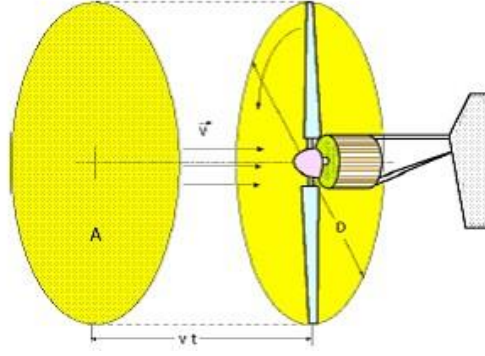


Figura 2.5. Aprovechamiento del viento

La sección barrida por la pala en un aerogenerador de eje horizontal y diámetro D es:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.15)$$

Y la potencia del viento:

$$N_{viento} = \frac{\pi \rho D^2 v^3}{8} \quad (2.16)$$

La velocidad del viento varía con el tiempo y, por lo tanto, su potencia N también variará; se puede considerar el valor medio de ambas, por ejemplo a lo largo de un año, obteniéndose:

$$\hat{N}_{viento\ anual} = \frac{1}{2} \rho A \hat{v}_{anual}^3 \quad (2.17)$$

CAPÍTULO 3

3. ESTUDIO Y MODELADO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN

Principalmente existen dos máquinas eléctricas de corriente alterna: Las máquinas síncronas y las asíncronas o de inducción, estas máquinas eléctricas pueden trabajar como motor y generador. Las máquinas síncronas cuya corriente de campo magnético es suministrado por una fuente externa de corriente directa; mientras que las de inducción cuya corriente de campo magnético se suministra por inducción magnética en sus devanados de campo.

Uno de los fundamentos de la máquina AC es que por los devanados de la armadura circula unas corrientes trifásicas de igual magnitud desfasados 120° , esto produce un campo magnético giratorio de magnitud constante. Este campo magnético rotatorio que es creado por los conductores del rotor e induce a los devanados de la armadura, del estator, unas tensiones trifásicas.

Recíprocamente, un sistema de corrientes trifásicas que circulan por el arrollamiento de la armadura produce un campo magnético giratorio, el cual interactúa con el campo magnético del rotor y se produce un par en el eje de la máquina. Estos dos efectos corresponden, a la acción generadora y motora, respectivamente.[10] Los generadores síncronos no se utilizan normalmente con turbinas eólicas, ya que el generador funciona a una velocidad constante y la velocidad de viento es variable.

A su pequeño tamaño por KW de potencia de salida, los generadores de inducción son muy favorables para los sistemas eólicos, además que es robusta, de bajo costo y requiere poco mantenimiento, motivo por el cual se considera apropiada para operar en lugares aislados.

3.1 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

La máquina asíncrona o de inducción está formada por un rotor y un estator, ver figura 2.1. El rotor es el inducido y las corrientes que circulan por él aparecen de la interacción con el flujo del estator, estas máquinas se pueden clasificar según el tipo de rotor:

- **Rotor en jaula de ardilla:** el rotor está en cortocircuito, está constituido por una serie de barras conductoras en paralelo cortocircuitadas mediante anillos circulares, ver figura 2.1.

- **Rotor devanado:** los devanados se conectan en estrella, en las máquinas trifásicas. El extremo de cada uno de los devanados de fase se conecta a anillos rozantes que están asilados del eje del rotor, ver figura 2.1, [8].

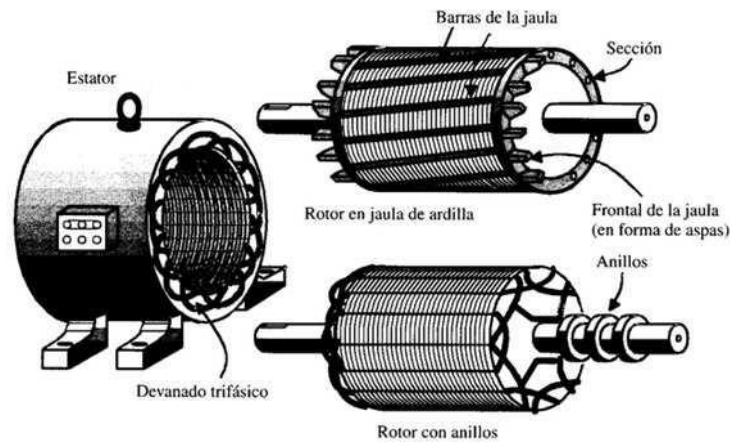


Figura 3.1 Máquina de inducción

3.1.1 PAR INDUCIDO EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN.

En la figura 2.2 muestra un motor de inducción de jaula de ardilla, Si se aplica al estator un sistema trifásico de voltajes, por sus devanados circula un sistema trifásico de corrientes.

Estas corrientes producen un campo magnético B_s , que rota en sentido contrario a las manecillas del reloj. Esta velocidad de rotación está dada por:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P} \quad (3.1)$$

Donde f_e es la frecuencia del sistema en Hz, P es el número de polos y n_{sinc} es la velocidad de rotación del campo magnético en rpm o velocidad síncrona. Este campo magnético rotacional B_s pasa sobre las barras del rotor e induce voltaje en ellas, el voltaje inducido en una barra determinada del rotor está dada por la ecuación: [9]

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (3.2)$$

Dónde:

v : Velocidad de la barra, relativa al campo magnético

B : Vector de densidad de flujo magnético

l : Longitud del conductor en el campo magnético

Este voltaje inducido, genera una corriente que circula por los devanados del rotor y la corriente de los devanados del rotor produce un campo magnético B_R . La interacción de estos campos magnéticos produce el par electromagnético de la máquina, este par está dado por: [8]

$$\tau_{ind} = k B_R \times B_s \quad (3.3)$$

Donde k es una constante que depende de la construcción de la máquina. La dirección del par resultante va en sentido contrario de las manecillas del reloj; debido a que la dirección del par inducido por el rotor va en sentido contrario a las manecillas del reloj. El rotor se acelera en esta dirección.

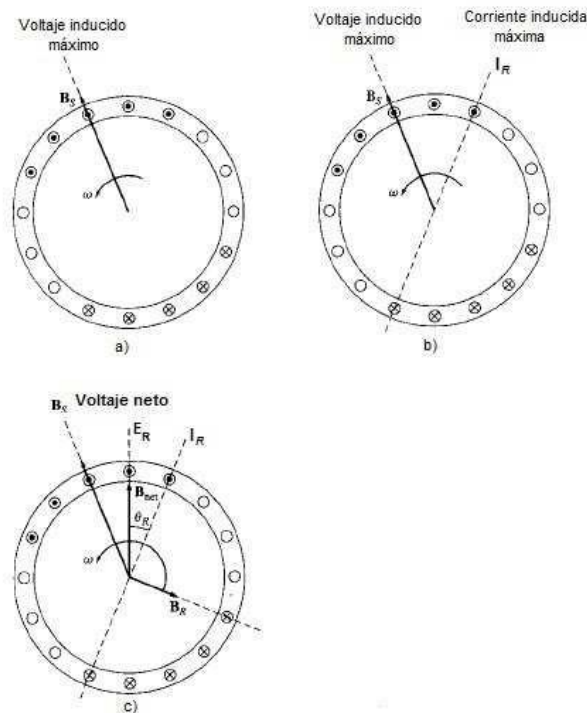


Figura 3.2 Par de inducción

Par de inducido en un motor de inducción. a) El campo rotacional del estator B_s induce voltaje en las barras del rotor; b) El voltaje del rotor produce un flujo de corriente en el rotor que atrasa el voltaje debido a la inductancia del mismo; c) La corriente del rotor produce un campo magnético en el rotor B_R que está a 90° detrás de ella y B_R interactúa con B_{net} para producir en la máquina un par en sentido contrario a las manecillas del reloj [9].

Sin embargo, la velocidad del motor tiene un límite finito. Si el rotor del motor de inducción estuviera rotando a velocidad síncrona, las barras del rotor serían estacionarias con respecto al campo magnético y no habría voltaje inducido. Si e_{ind} fuera igual a 0, no habría corriente en el rotor ni tampoco campo magnético rotatorio. Sin campo magnético el par inducido sería cero y el rotor por fricción se frenaría. En conclusión el motor de inducción puede girar a velocidades cercanas a la velocidad síncrona, pero nunca alcanzará a la velocidad síncrona. [9]

3.1.2 DESLIZAMIENTO DEL ROTOR

El voltaje inducido en los devanados del rotor depende de la velocidad del rotor con respecto a los campos magnéticos. Como el comportamiento de la máquina de inducción depende de los voltajes y las corrientes del rotor, es útil hablar en términos de la velocidad relativa entre el rotor y el campo magnético. En general se utiliza dos términos para definir el movimiento relativo. Uno de ellos es la velocidad de deslizamiento, definida con la siguiente ecuación [9].

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad (3.4)$$

Dónde:

n_{des} : Velocidad de deslizamiento de la máquina.

n_{sinc} : Velocidad de los campos magnéticos.

n_m : Velocidad mecánica del eje del motor.

El otro término es el desplazamiento, el cual es la velocidad relativa expresada sobre una base en por unidad o en porcentaje, está definido como: [9]

$$s = \frac{n_{des}}{n_{sinc}} (100\%) = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (100\%) \quad (3.5)$$

Esta ecuación también se puede expresar en términos de la velocidad angular w (radianes por segundo):

$$s = \frac{w_{des}}{w_{sinc}} (100\%) = \frac{w_{sinc} - w_m}{w_{sinc}} (100\%) \quad (3.6)$$

Se puede expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en función de la velocidad síncrona y el deslizamiento como:

$$w_m = (1 - s)w_{sinc} \quad (3.7)$$

La frecuencia del motor es directamente proporcional a la diferencia de la velocidad del campo magnético del estator w_{sinc} y la velocidad del rotor w_m . La frecuencia del rotor está dada por: [8]

$$f_r = sf_e \quad (3.8)$$

3.1.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Los principales aspectos que se deben tener en cuenta para la construcción del modelo son:

- **Pérdidas en el cobre:** son pérdidas por calentamiento resistivo en los devanados del estator y rotor.
- **Pérdidas por corrientes parásitas:** son pérdidas por calentamiento resistivo en el núcleo del estator, son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado al motor.
- **Flujo disperso:** son los flujos que escapan del núcleo y del rotor y pasan únicamente a través de uno de los devanados del estator.
- **Pérdidas por histéresis:** están relacionadas con los reordenamientos de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada semiciclo.

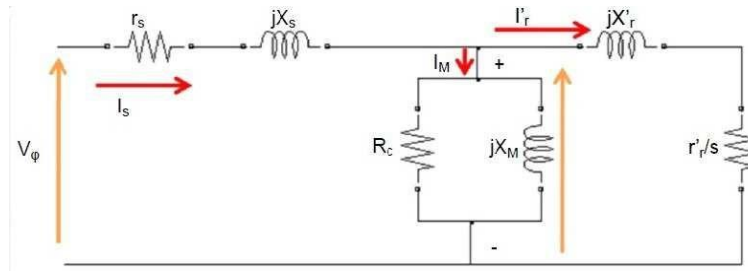


Figura 3.3 Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.

En la figura 2.3 se observa el circuito equivalente del motor de inducción, r_r , r_s se modelan como las pérdidas en el cobre, donde r_r , r_s son pérdidas resistivas tanto en el rotor como en el estator, respectivamente. El flujo disperso es modelado por una inductancia en el rotor y otra en el estator, la corriente de magnetización se modela por una reactancia X_M . Las pérdidas en el núcleo debidas al fenómeno de histéresis y corrientes parásitas, se modelan por una resistencia R_C . En la práctica es más recomendable referir el modelo del rotor al estator, así como se muestra en la figura 2.3

3.2 GENERADOR DE INDUCCIÓN

En la figura 2.4, muestra la curva de par-velocidad de la máquina de inducción. Si una máquina asíncrona se impulsa a una velocidad superior a la síncrona n_{sinc} , es decir, un deslizamiento negativo, el motor recibe potencia mecánica en lugar de entregarla y así operaría con un generador.

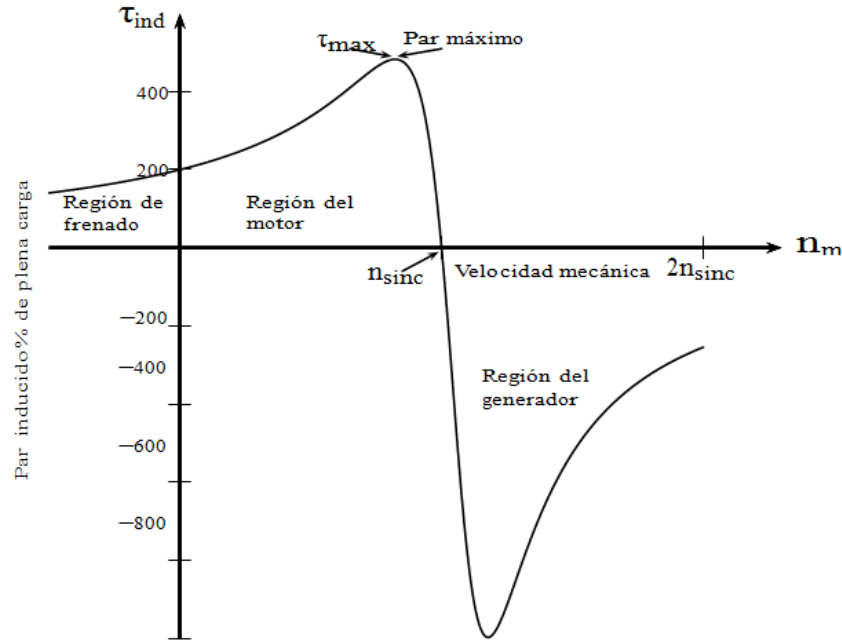


Figura 3.4 Par-velocidad de una máquina de inducción

El generador de inducción no posee un circuito de campo separado, por esta razón no puede producir potencia reactiva, de hecho, consume potencia reactiva y para mantener el campo magnético del estator necesita estar permanentemente conectado a una fuente de potencia reactiva externa, esta fuente también debe de controlar el voltaje en terminales del generador.

3.2.1 MODELO DEL SCIG

TRANSFORMADA DQ

Uno de los problemas comunes en la ingeniería es modelar las máquinas eléctricas. Las ecuaciones diferenciales son muy complejas ya que dependen de la posición relativa del rotor con respecto al estator. Por ello, para la solución de este problema se suelen emplear cambios de variables que las simplifiquen. Una de esas transformaciones es la conocida como transformada dq.

Mediante la transformación en coordenadas dq, a partir de un sistema trifásico, ya sea de tensiones, intensidades o flujos, puesto sobre un sistema de ejes abc que forman 120° , se obtiene un sistema equivalente de tensión, intensidad o flujo, asociado a unos ejes que forman 90° , llamados dq, que giran a una determinada velocidad. En esta transformación se pueden derivar

sistemas de ecuaciones más sencillos para los elementos como la máquina de inducción. Para obtener las componentes dq se proyectan las componentes v_a , v_b y v_c sobre los ejes dq. Se pueden obtener mediante la siguiente expresión matricial. [12]

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \Leftrightarrow V_{dq0} = kV_{abc} \quad (3.9)$$

Donde v_a , v_b , v_c : es conjunto de señales trifásicas situadas sobre los ejes a, b y c, respectivamente; v_q y v_d representan las componentes a, b y c proyectadas sobre los ejes d y q respectivamente; v_0 es el valor medio de las componentes a, b y c, llamada componente de secuencia cero.

k es la matriz de transformación:

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

La variable θ representa el ángulo que forman los ejes dq elegidos con los abc. Dicho ángulo se puede poner en función de la velocidad de giro relativa ω de los ejes dq con respecto a los ejes abc: [10].

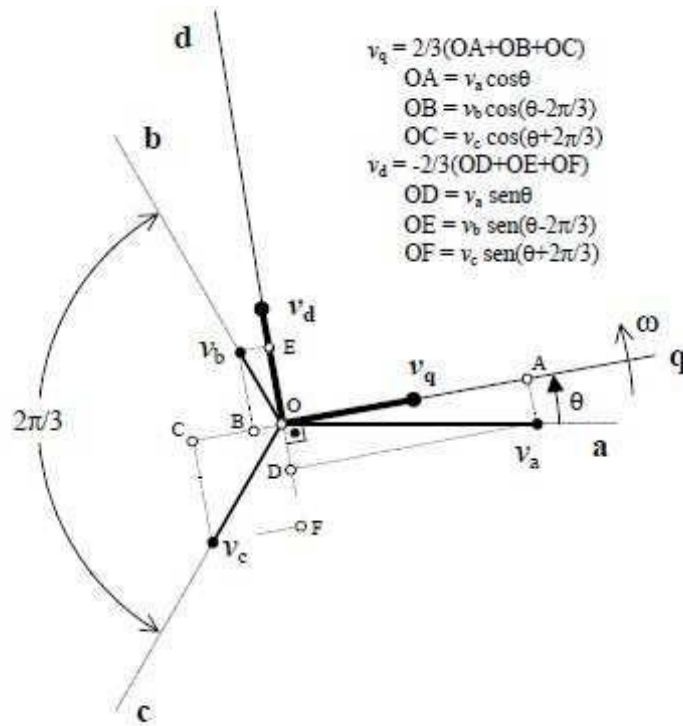


Figura 3.5 Ejes de transformación dq.

El ángulo θ que aparece en la ecuación anterior representa un ángulo eléctrico, lo mismo ocurre con la velocidad ω . Se representa con la siguiente ecuación:

$$\omega = p\omega_m \quad (3.11a)$$

$$\theta = p\theta_m \quad (3.11b)$$

En una máquina eléctrica, el ángulo que representa el desplazamiento entre los ejes eléctricos de rotor y estator, es igual al número de pares de polos p por el ángulo mecánico existente entre rotor y estator. Donde ω_m es la velocidad mecánica y θ_m es el ángulo mecánico, de forma que: $\omega_m = d\theta_m/dt$.

Para la transformación inversa, se emplean las expresiones:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \mathbf{k}^{-1} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{V}_{abc} = \mathbf{k}^{-1} \mathbf{V}_{dq0} \quad (3.12)$$

Dónde:

$$\mathbf{k}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

En algunos libros existen unas transformaciones dq, las cuales aparecen en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Sistemas de referencia

Velocidad de giro de las coordenadas de referencia	Interpretación	Variables dq	Ejes
ω	Variable del circuito estacionario referidas a un eje de coordenadas que gira a una velocidad arbitraria	V_d, V_q, V_0	$d-q$
0	Variable del circuito estacionario referidas a un eje de coordenadas que gira a una velocidad estacionaria (Clark)	V_d^s, V_q^s, V_0	d_s-q_s
ω_r	Variable del circuito estacionario referidas a un eje de coordenadas que gira con el rotor (Park)	V_d^r, V_q^r, V_0	d_r-q_r
ω_e	Variable del circuito estacionario referidas a un eje de coordenadas que gira a velocidad síncrona	V_d^s, V_q^s, V_0	d_s-q_s

Para las corrientes del estator en un sistema de referencia a,b,c, como i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} se puede representar en otro sistema de referencia mediante la transformada de dq0, ver figura 2.5, [11].

El ángulo θ_s se define como el ángulo comprendido entre el eje magnético de la fase a (a lo largo de ese eje se sitúa el valor máximo del campo magnético de la fase a) y el eje horizontal del sistema de referencia a emplear, que es el eje α_s en el caso del sistema fijado al estator o el eje d en caso del sistema móvil, ver figura 2.5, [14].

El ángulo θ_s evoluciona respecto al tiempo de la siguiente manera:

$$\theta_s = \frac{d\theta_s}{dt} + \theta_s(t = 0) = w_1 t + \theta_s(t = 0) \quad (3.14)$$

El modelo del generador de inducción es muy similar al del motor de inducción. Las siguientes ecuaciones describen un generador de inducción de jaula de ardilla, en el marco de referencia dq.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \omega \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt}, \quad (3.15a)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt}, \quad (3.15b)$$

$$v_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + (\omega - \omega_r) \Psi_{qr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt}, \quad (3.15c)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + (\omega - \omega_r) \Psi_{dr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt}, \quad (3.15d)$$

Donde $v_{ds}, v_{qs}, v_{dr}, v_{qr}, R_s, R_r, l_m, \Psi_{ds}, \Psi_{qs}, \Psi_{dr}, \Psi_{qr}, i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \omega$ y ω_r es el voltaje en el estator en eje directo, voltaje del estator en el eje de cuadratura, voltaje en el rotor en el eje directo, voltaje en el rotor en el eje de cuadratura, resistencia en el estator, resistencia en el rotor, inductancia mutua, enlace de flujo del estator en el eje directo, enlace de flujo del estator en el eje de cuadratura, enlace de flujo del rotor en el eje directo, enlace de flujo del rotor en el eje de cuadratura, corriente del estator en el eje directo, corriente del estator en el eje de cuadratura, corriente del rotor en el eje directo, corriente del rotor en el eje de cuadratura, marco de referencia de la velocidad angular y velocidad angular eléctrica del rotor, respectivamente. Ver figura 2.6 [13].

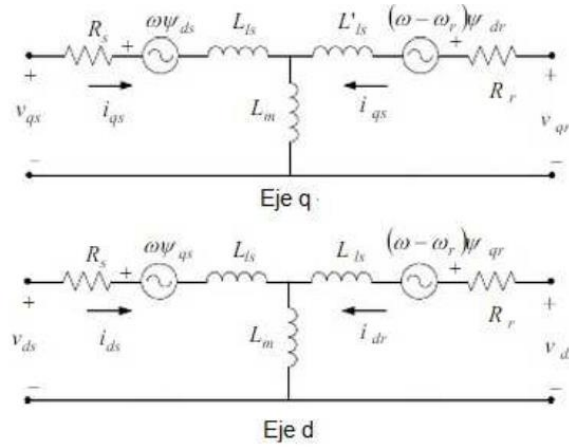


Figura 3.6 Modelo del generador de inducción en el eje dq

Las corrientes del estator y rotor pueden ser expresadas en términos de los enlaces de flujo dq, como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \\ \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{l_r}{l_\alpha} & 0 & \frac{l_m}{l_\alpha} & 0 \\ 0 & -\frac{l_r}{l_\alpha} & 0 & \frac{l_m}{l_\alpha} \\ \frac{l_m}{l_\alpha} & 0 & -\frac{l_s}{l_\alpha} & 0 \\ 0 & \frac{l_m}{l_\alpha} & 0 & -\frac{l_s}{l_\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$l_\alpha = l_m^2 - l_r l_m \quad (3.17)$$

Donde, l_s y l_r es la inductancia del estator y la inductancia del rotor respectivamente. Al remplazar las ecuaciones (2.10) y (2.11) en las ecuaciones (2.9), se obtienen los siguientes resultados:

$$v_{ds} = \left[\frac{d}{dt} + \frac{R_s}{l_s} \right] \Psi_{ds} - \omega \Psi_{qs} - \frac{R_s l_m}{l_s} i_{dr} \quad (3.18a)$$

$$v_{qs} = \omega \Psi_{ds} + \left[\frac{d}{dt} + \frac{R_s}{l_s} \right] \Psi_{qs} - \frac{R_s l_m}{l_s} i_{qr} \quad (3.18b)$$

$$V_{dr} = \frac{l_m}{l_s} \frac{d}{dt} \Psi_{ds} - (\omega - \omega_r) \frac{l_m}{l_s} \Psi_{qs} + \left(R_r - \frac{l_\alpha}{l_s} \frac{d}{dt} \right) i_{dr} + (\omega - \omega_r) \frac{l_\alpha}{l_s} i_{qr} \quad (3.18c)$$

$$V_{qr} = (\omega - \omega_r) \frac{l_m}{l_s} \Psi_{ds} - \frac{l_m}{l_s} \frac{d}{dt} \Psi_{qs} - (\omega - \omega_r) \frac{l_\alpha}{l_s} i_{dr} + \left(R_r - \frac{l_\alpha}{l_s} \frac{d}{dt} \right) i_{qr} \quad (3.18d)$$

En el SCIG, las tensiones de rotor en el eje directo y en cuadratura son cero. [13]

Las ecuaciones para la potencia activa P y potencia reactiva Q del generador de inducción de jaula de ardilla son los siguientes:

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (3.19a)$$

$$Q_s = v_{qs} i_{qs} - v_{ds} i_{ds} \quad (3.19b)$$

Las ecuaciones (2.12) y (2.13) se describe la parte eléctrica de un SCIG. Sin embargo, también la parte mecánica debe tenerse en cuenta para las simulaciones de sistemas de potencia dinámicas. La siguiente ecuación del torque eléctrico desarrollado por un SCIG, [14].

$$T_{elec} = \frac{3}{2}p(\Psi_{ds}i_{qs} - \Psi_{qs}i_{ds}) \quad (3.20)$$

Los cambios en la velocidad del generador que resultan de la diferencia en el par eléctrico y mecánico se pueden calcular usando la ecuación de movimiento del generador.

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{2H}(T_{elec} - Fw_r - T_{mec}) \quad (3.21a)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = w_r \quad (3.21b)$$

Donde H es la constante de inercia del rotor [s]y T_{mec} es el torque mecánico [p.u.], F es el coeficiente de amortiguamiento, [14].

CAPÍTULO 4

4 DESCRIPCIÓN DE CONVERTIDOR BOOST

El convertidor Boost es un circuito en el cual la señal de voltaje de salida siempre es mayor que la señal de voltaje de entrada, con una relación mayor o igual a 1 entre la señal de salida y la de entrada en estado estacionario [15]. El circuito que describe este convertidor puede verse en la figura 3.1:

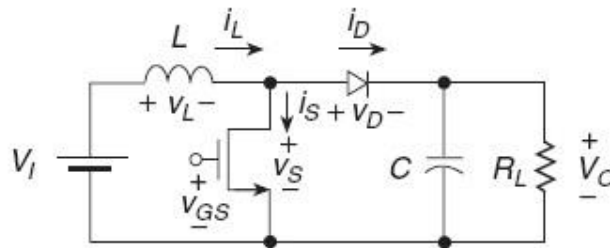


Figura 4.1 Circuito que describe el convertidor Boost

Para analizar este circuito, es necesario tomar las dos diferentes etapas de switcheo generada por el transistor de potencia IGBT, es decir tanto en el estado de encendido como en el estado de apagado, para así poder determinar la función de transferencia entre las tensiones de salida y entrada respectivamente, y adicionalmente poder calcular los diferentes valores elementos que conforman el circuito, en especial del inductor el cual nos asegurara un funcionamiento de la corriente en modo continuo, ya que si el circuito trabaja con una corriente en modo discontinua sobre el inductor, no se puede tener una carga en circuito abierto porque el condensador de salida no tendría camino alguno para poderse descargar, lo cual no es deseable ya que para nuestros fines deseamos entregar la mayor cantidad de energía posible a una respectiva carga.

Para realizar el análisis se debe considerar que los elementos son ideales, evitando perdidas en los mismos. Adicionalmente se les considera independientes de la frecuencia y lineales para los elementos pasivos, mientras que los elementos de conmutación como son el transistor y el diodo se les considera ideales sin efectos inductivos o capacitivos para no tener en cuenta las pérdidas y realizar un análisis más sencillo. Se divide la operación del circuito en base al ciclo útil de trabajo de la señal de conmutación.

a) $0 < t < DT$

Comenzamos entonces el análisis cuando el transistor entra en el estado de encendido. El circuito respectivo puede apreciarse en la figura 3.2, reemplazando los elementos de conmutación por interruptores ideales [15]:

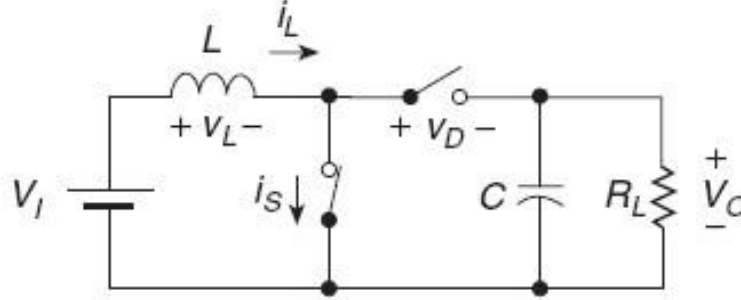


Figura 4.2 Circuito equivalente con el transistor encendido

Se ve que el diodo está polarizado en sentido inverso debido a que la tensión sobre el mismo es igual a $-V_0$ por lo cual no entra a conducir. La tensión existente sobre el transistor y la corriente que circula por el diodo son iguales a cero. El voltaje a través del inductor es igual a $V_L = V_I = L \frac{di_L}{dt}$. Se ve adicionalmente que la corriente suministrada al transistor es igual a la corriente que circula por el inductor y a la corriente de entrada, por lo que integrando la expresión anterior tenemos que la corriente sobre estos elementos es igual a:

$$i_I = i_S = i_L = \frac{1}{L} \int_0^{DT} V_1 dt + i_L(0) \quad (4.1)$$

Donde $i_L(0)$ es el valor de la corriente en el inductor en el inicio del ciclo de encendido. De la expresión anterior el valor pico de corriente sobre el inductor en este intervalo es:

$$i_{LPico}(DT) = \frac{V_1 DT}{L} + i_L(0) \quad (4.2)$$

La variación de corriente en el inductor o el valor pico a pico de la corriente se calcula por medio de la expresión:

$$\Delta i_L = i_L DT - i_L(0) = \frac{V_1 DT}{L} = \frac{V_1 D}{F_s} \quad (4.3)$$

Donde F_s es la frecuencia de conmutación del transistor. Finalmente, la corriente sobre el condensador de salida es igual a $i_c = -\frac{V_0}{R}$.

b) $DT < t < T$

Para este ciclo, el circuito equivalente se muestra en la figura 3.3, donde el transistor se encuentra en estado de apagado y el diodo ha comenzado a conducir debido a que el inductor se comporta como una fuente de corriente y porque ha cambiado su polaridad de tensión, haciendo que el terminal ánodo sea más positiva con respecto al terminal cátodo:

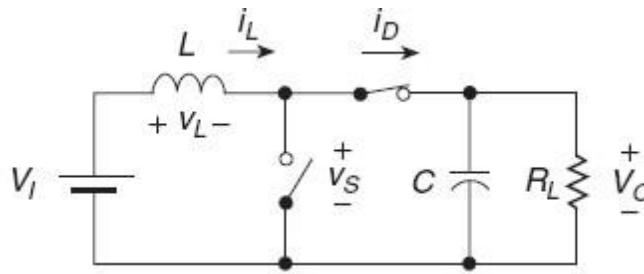


Figura 4.3 Circuito equivalente con el transistor apagado

Durante este tiempo, la corriente del transistor y la tensión del diodo son iguales a cero. El valor de tensión sobre el inductor es igual a $V_L = V_I - V_0 = L \frac{di_L}{dt} < 0$. Lo que indica que la tensión de salida es mayor que la de entrada. En este caso, la corriente del diodo es igual a la corriente sobre el inductor y a la misma suministrada por la fuente, por lo que integrando la expresión anterior, se encuentra que la corriente sobre estos elementos en este intervalo de tiempo es:

$$i_I = i_D = i_L = \frac{1}{L} \int_{DT}^T V_I - V_0 + i_L DT = \frac{V_I - V_0(1-D)T}{L} + i_L DT \quad (4.4)$$

$$i_I = i_D = i_L = \frac{V_I - V_0(1-D)}{LF_s} + i_L(DT) \quad (4.5)$$

Donde $i_L(DT)$ es la corriente inicial del inductor en el valor $t = DT$. El valor de la corriente pico a pico del inductor es igual a:

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(t) = \frac{V_I - V_0(1-D)}{LF_s} \quad (4.6)$$

El voltaje a través del transistor es igual a la tensión de salida, es decir $V_S = V_0$. La corriente en el condensador es igual a $i_C = i_L - i_R$. Finalmente, nos disponemos a calcular la función de transferencia del circuito, para lo cual usaremos el concepto de que la variación de corriente sobre el inductor en un ciclo de operación debe ser igual a cero, es decir:

$$\Delta i_{LEncendido} + \Delta i_{LApagado} = 0 \quad (4.7)$$

Al reemplazar los respectivos términos en la expresión anterior, tenemos que:

$$\frac{V_1 D}{L F_S} + \frac{V_1 - V_0}{L F_S} = 0 \rightarrow \frac{V_0}{V_1} = \frac{1}{1-D} \quad (4.8)$$

De acuerdo a lo anterior, este convertidor produce una tensión de salida mayor o igual a la entrada. Sin embargo si vemos que cuando el ciclo útil se acerca a un valor de 1, la salida se hará igual a un valor infinito. En la práctica esto no puede pasar, ya que al trabajar con elementos reales, generan pérdidas que evitan que se tenga una tensión inmensa. Las corrientes en el inductor, diodo y condensador se pueden apreciar en la figura 3.4.

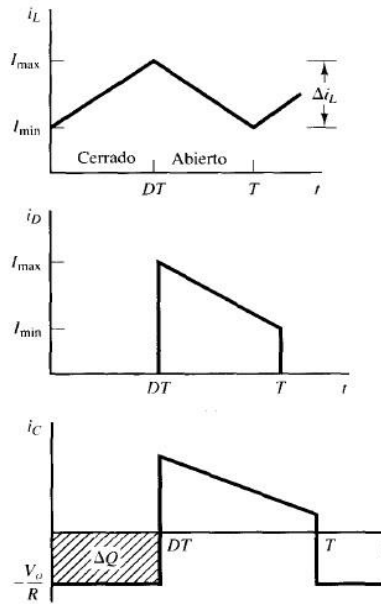


Figura 4.4 Corrientes en el inductor, diodo y condensador

Procedemos a calcular el valor medio de la corriente en el inductor, para lo cual supondremos que la potencia entregada a la carga es igual a la potencia suministrada por la fuente, es decir $P_I = P_o$ en el caso ideal. La potencia de salida es igual a:

$$P_o = \frac{v_o^2}{R} \quad (4.9)$$

Mientras que la potencia de entrada es igual a $P_I = V_I I_I = V_I I_L$, recordando que la corriente sobre el inductor es la misma corriente que entrega la fuente. Igualando las potencias tenemos:

$$\frac{V_o^2}{R} = V_I I_L \rightarrow I_L = \frac{V_o^2}{R V_I} = \frac{\left(\frac{V_1}{1-D}\right)^2}{R V_1} = \frac{V_1}{R(1-D)^2} \quad (4.10)$$

Y los valores máximo y mínimo de corriente en el inductor son:

$$i_{LMAX} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (4.11)$$

$$i_{LMIN} = I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \quad (4.12)$$

Para asegurar que la corriente del inductor opere en modo continuo, el mínimo valor de la corriente debe ser igual a cero. Tomando la expresión anterior para el mínimo valor de corriente sobre el inductor e igualando a cero, calculamos el mínimo valor del inductor para operar en modo continuo:

$$I_L - \frac{\Delta i_L}{2} = 0 \rightarrow \frac{V_1}{R(1-D)^2} = \frac{V_1 D}{2 L_{MIN} f_s} \rightarrow L_{MIN} = \frac{RD(1-D)^2}{2 f_s} \quad (4.13)$$

De la figura 3.4, vamos a calcular el valor del condensador. En la práctica el rizado que posee el condensador debe ser una variación o valor pico a pico AC de la tensión de salida muy pequeño, por lo cual se consideraría que la tensión obtenida es casi constante. Como vemos, la forma de onda de la corriente del condensador posee un área rectangular, lo cual facilita los cálculos del condensador, ya que la variación de carga almacenada o entregada en un periodo de acuerdo al área de la gráfica es igual a:

$$|\Delta Q| = \frac{V_0 D T}{R} = C \Delta V_0 \quad (4.14)$$

Por lo que el valor del condensador con un determinado valor de rizo y una tensión de salida a una frecuencia de conmutación f_s es:

$$C = \frac{V_0 D}{f_s R \Delta V_0} \quad (4.15)$$

CAPÍTULO 5

5 ESTUDIO Y MODELADO DEL PANEL FOTOVOLTAICO

La Energía Eléctrica es el recurso básico e imprescindible que posibilita el desarrollo de la sociedad y garantiza su bienestar. Los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos otorgan un método efectivo de provisión de energía eléctrica, lo que es de especial interés en países donde la distribución demográfica muestra un mayor asentamiento de la población en comunidades remotas, que no cuentan con acceso a la red de suministro eléctrico y, con frecuencia, carecen de infraestructura básica. Debido a las cualidades que presenta este método de generación eléctrica, como ser modularidad y mantenimiento reducido, además de no ser contaminante, puede constituir una alternativa factible para cubrir las necesidades básicas de energía eléctrica demandadas por estas comunidades. Los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos producen electricidad utilizando como única fuente primaria la energía solar y su configuración más básica es la formada por los paneles fotovoltaicos, baterías y cargas eléctricas. En adición, para convertirlos en alternativas económicamente realizables es vital determinar configuraciones apropiadas en términos de cantidad de paneles y capacidad en baterías, que puedan atender la demanda de forma confiable y a un bajo costo. Existen varios métodos desarrollados para lograr estas configuraciones ideales, que van desde los métodos de dimensionamiento simplificados o intuitivos [16], hasta los de simulación computacional, cada cual con sus ventajas, pero siempre en busca por minimizar costos de instalación y garantizar una determinada confiabilidad necesaria para el tipo de aplicación.

5.1 DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO.

Los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos son un conjunto de elementos, o una integración de los mismos, necesarios para atender de forma permanente y confiable la demanda de energía eléctrica de un consumo determinado teniendo como única fuente de energía la radiación solar incidente [8,10]. Su utilización se destina con mayor énfasis a aplicaciones rurales y electrificación de comunidades aisladas sin acceso a redes de suministro de energía, donde han demostrado tener ciertas ventajas económicas en instalaciones de pequeño porte. Estos sistemas basan su funcionamiento en el panel fotovoltaico, que es un dispositivo semiconductor fotosensible que al ser iluminado genera una tensión continua entre sus bornes. La asociación de

estos paneles en configuraciones adecuadas del tipo serie-paralelo puede garantizar el suministro de energía eléctrica a cargas determinadas. Su operación es simple, silenciosa y no requieren de mantenimiento constante y tampoco emiten gases de efecto invernadero, lo que los convierte en uno de los métodos de generación eléctrica más seguros y limpios que existen [1]. Las características de la electricidad generada por los paneles fotovoltaicos dependen esencialmente de la radiación solar incidente en el plano de los mismos que, de acuerdo a las condiciones meteorológicas, puede variar significativamente a lo largo del día. La naturaleza estrictamente aleatoria de la radiación solar hace necesaria la presencia de dispositivos que se encarguen mantener las características de la energía eléctrica generada dentro de los estándares apropiados para su utilización. El esquema de la figura 1, muestra los componentes básicos de un Sistema Fotovoltaico Autónomo que acompañan a los paneles.

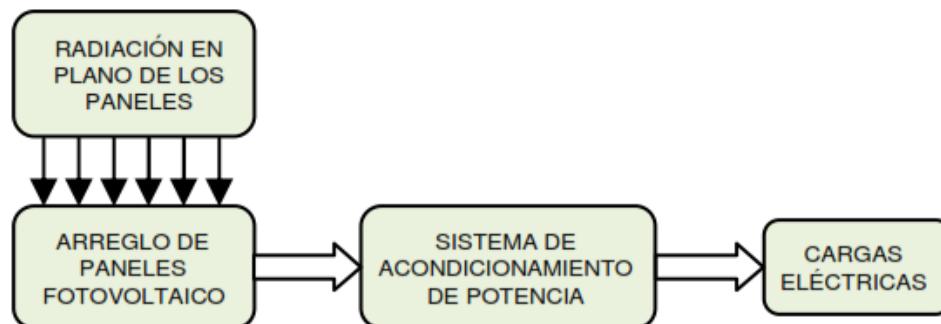


Figura 5.1 Esquema para la producción de energía por medio de un panel PV

5.2 MODELO MATEMÁTICO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO.

En la figura 4.2 se muestra el circuito equivalente del modelo general de un panel fotovoltaico compuesta por un diodo, una resistencia en paralelo que representa la corriente de fuga y una resistencia serie que describe la resistencia interna al flujo de corriente, la ecuación característica que describe el comportamiento de una panel fotovoltaico se da como:

$$I = I_{PH} - I_s \left(\exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{kTA} \right] - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{SH}} \quad (5.1)$$

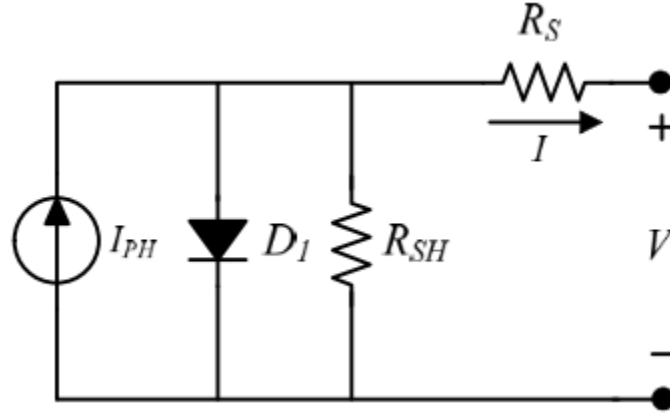


Figura 5.2 Circuito equivalente de un panel fotovoltaico

Donde I_{PH} es la corriente generada por la luz o normalmente llamada fotocorriente, I_s es la corriente de saturación del panel, q ($= 1.6 \times 10^{-19}$ C) esta es la carga del electrón, k ($= 1.38 \times 10^{-23}$ J/K) esta es la constante de Boltzmann, T es la temperatura de operación del panel, A es el factor ideal, R_{SH} es la resistencia shunt y R_S es la resistencia serie. La fotocorriente normalmente depende de la irradiación solar y de la temperatura de trabajo del panel la cual se obtiene de la siguiente manera:

$$I_{PH} = \lambda(I_{sc} + K_1(T - T_r)) \quad (5.2)$$

Donde I_{sc} es la corriente de corto circuito del panel a 25°C y 1kw/m^2 , K_1 es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito, T_r es la temperatura de referencia del panel, y λ es la irradiación en kw/m^2 , por otro lado la corriente de saturación varia con la temperatura del panel, la cual se describe:

$$I_s = I_{RS} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[qE_G \frac{\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)}{kA} \right] \quad (5.3)$$

Donde I_{RS} es la corriente de saturación inversa a la temperatura de referencia y a una irradiación solar, E_G es la banda muerta de energía del semiconductor usado en el panel, el factor ideal A depende de la tecnología del panel fotovoltaico y se muestra una lista de posibles valores en la tabla 4.1

Tabla 5.1 Valores de A dependiendo la tecnología del panel

Technology	A
Si-mono	1.2
Si-poly	1.3
A-Si:H	1.8
A-Si:H tandem	3.3
A-Si:H triple	5
CdTe	1.5
CIS	1.5
AsGa	1.3

La corriente de saturación inversa a la temperatura de referencia puede se obtenido aproximadamente de la siguiente manera:

$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{\exp\left[\frac{qV_{oc}}{N_S kAT}\right] - 1} \quad (5.4)$$

Para un panel fotovoltaico ideal, es decir sin perdidas y sin corrientes de fuga hacia tierra ($R_s = 0$; $R_{SH} = \infty$), La ecuación (4.1) puede aproximarse a la siguiente expresión:

$$I = I_{PH} - I_s \left(\exp \left[\frac{qV}{kTA} \right] - 1 \right) \quad (5.5)$$

CAPÍTULO 6

6 CONTROLADOR DIFUSO

El control difuso es un método alternativo conveniente para construir controles no lineales mediante el uso de información heurística que proviene de un experto. La metodología de diseño consiste en construir un conjunto de reglas orientadas a controlar determinado proceso, estas reglas son proporcionadas al controlador difuso con el fin de emular la toma de decisiones del experto. [17]

La arquitectura típica de un controlador difuso se muestra en la figura 6.1

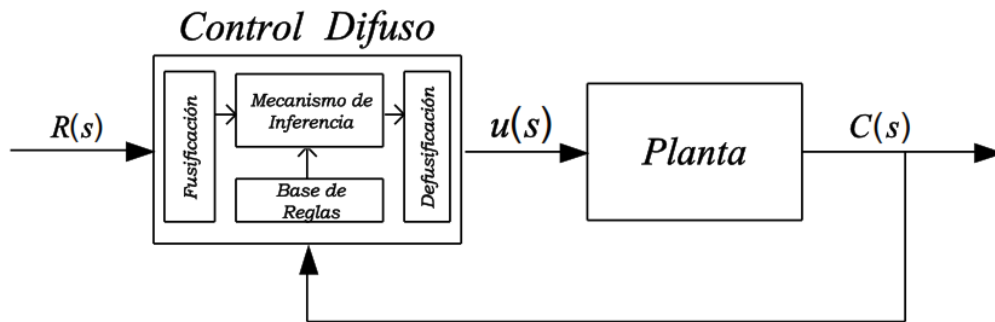


Figura 6.1 Arquitectura típica de un control difuso.

En la arquitectura del control difuso se aprecian cuatro componentes principales:

- La base de reglas que representa el conocimiento sobre el cómo controlar el sistema.
- El mecanismo de inferencia que evalúa las reglas de control que son relevantes en un determinado momento y en dependencia de ello determina el valor de salida hacia la planta.
- El bloque de fusificación que modifica el valor de entrada, de forma tal que pueda ser interpretada y comparada por la base de reglas.
- El bloque de defusificación que convierte la conclusión alcanzada mediante la inferencia hacia valores de insumo para el proceso.

Un controlador difuso puede ser visualizado como una transformación lineal estática entre las entradas y las salidas. Las entradas se definen como $u_i \in U_i$ con $i = 1, 2, 3, \dots, n$ y las salidas como el conjunto $y_i \in Y_i$ con $i = 1, 2, 3, \dots, m$. [18]

El bloque defusificación convierte los conjuntos de entrada u_i a conjuntos difusos, una vez hecho esto, los conjuntos difusos pueden ser procesados por el mecanismo de inferencia para llegar a alguna conclusión difusa y posteriormente, el bloque defusificación se encarga de convertir la conclusión en valores reales.

Los conjuntos ordinarios U_i y Y_i son llamados universos de discurso de u_i y y_i respectivamente.

Para especificar las reglas, se hace uso de expresiones lingüísticas que definen el comportamiento de entradas y salidas. Dichas expresiones son conocidas como variables lingüísticas, constantes simbólicas que forma conjunto difusos. Así pues u_i y y_i son las variables lingüísticas para U_i y Y_i .

Las variables lingüísticas \tilde{u}_i y \tilde{y}_i toma un conjunto de variables lingüísticas notados por $\tilde{A}_i = \{\tilde{A}_i^j : j = 1, 2, 3, \dots, n\}$ y $\tilde{B}_i = \{\tilde{B}_i^p : p = 1, 2, 3, \dots, m\}$, respectivamente; por ejemplo $\tilde{A}_1^1 = \text{"lento"}$ y $\tilde{A}_1^2 = \text{"No tan lento"}$, son variables que pudieran describir una velocidad. [18]

La función de las salidas hacia las entradas en un sistema difuso se realiza mediante sentencias en la estructura lógica *modusponens* (si, entonces). Usualmente las entradas son asociadas con premisas y las salidas con consecuentes.

Las funciones que transforman los valores de los universos de discurso U_i y Y_i a los conjuntos difusos \tilde{A}_i^j y \tilde{B}_i^p son llamadas funciones de membresía y se denotan por $\mu(u_i)$ y $\mu(y_i)$. Así pues, dada una variable \tilde{u}_i con un valor lingüístico \tilde{A}_i^j definido sobre un universo de discurso U_i , y una función de membresía $\mu(u_i)$ que transforma U_i a un intervalo de valores $[0, 1]$, el conjunto difuso denotado por \tilde{A}_i^j está definido por la siguiente ecuación:

$$\tilde{A}_i^j = \left\{ \left(u_i, \mu_{\tilde{A}_i^j}(u_i) \right) : u_i \in U_i \right\} \quad (6.1)$$

Una vez se han definido los universos de discurso de entradas y salidas, estableciendo las variables lingüísticas y fusificado cada entrada del sistema a través de la función de membresía

$\mu(u_i)$, el mecanismo de inferencia se encarga de determinar, con base a los valores de membresía en las entradas, que conclusión debe inferirse, este valor de conclusión es un valor un valor difuso el cual es convertido a una variable de entrada al proceso e impactar en el comportamiento de la variable controlada. [18]

Existen diferentes métodos para defusificar el valor alcanzado por la inferencia, dentro de los más populares se encuentran:

- El método del centro del área o COA por sus siglas en inglés (Center Of Area)
- Criterio de Max
- El método de la medida del máximo
- Método del centro de gravedad o COG por sus siglas en inglés (Center Of Gravity).

CAPÍTULO 7

7 RESULTADOS Y ANALISIS

7.1 SIMULACIÓN

En este capítulo se muestra la simulación y resultados obtenidos a partir del modelo implementado, el cual se realizó en MATLAB/SIMULINK. Las pruebas realizadas radican en implementar un control difuso tipo mamdani para el control de la tensión a la salida del inversor donde están conectados los paneles fotovoltaicos y el generador eólico. Lo anterior es realizado con el objetivo de observar el comportamiento del controlador difuso ante diferentes escenarios.

Para el generador eólico se implementó el bloque Asynchronous Generator con las herramientas necesarias para producir un nivel de tensión deseado para poder realizar las pruebas.

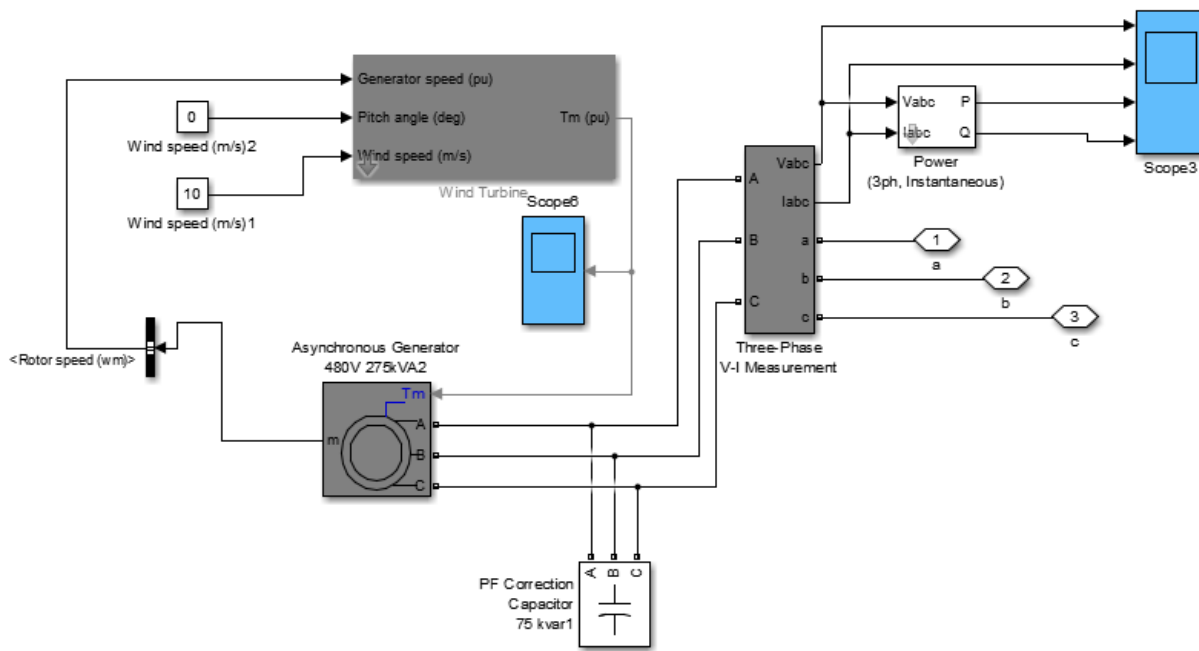


Figura 7.1 Generador eólico implementado

Para el panel fotovoltaico se implementó un modelo matemático con el cual se implementa de forma que genere un nivel de tensión y corriente suficiente para que el convertidor Boost pueda elevar la tensión y poderlo conectar en paralelo con el generador eólico, antes de conectarlos en

paralelo se pusieron diodos para evitar corrientes inversas, es decir, para garantizar que la corriente siempre se dirija a la carga.

El control difuso mamdani solo controla una variable. Cuenta con dos entradas: la referencia y la señal que se desea controlar; como se debe ejercer control sobre el voltaje trifásico en la carga, en necesario convertir este voltaje a voltaje de secuencia positiva, donde se vuelve un voltaje en magnitud y ángulo. El control se aplica solo a la magnitud, más no al ángulo, debido a que se desea controlar el voltaje en la carga.

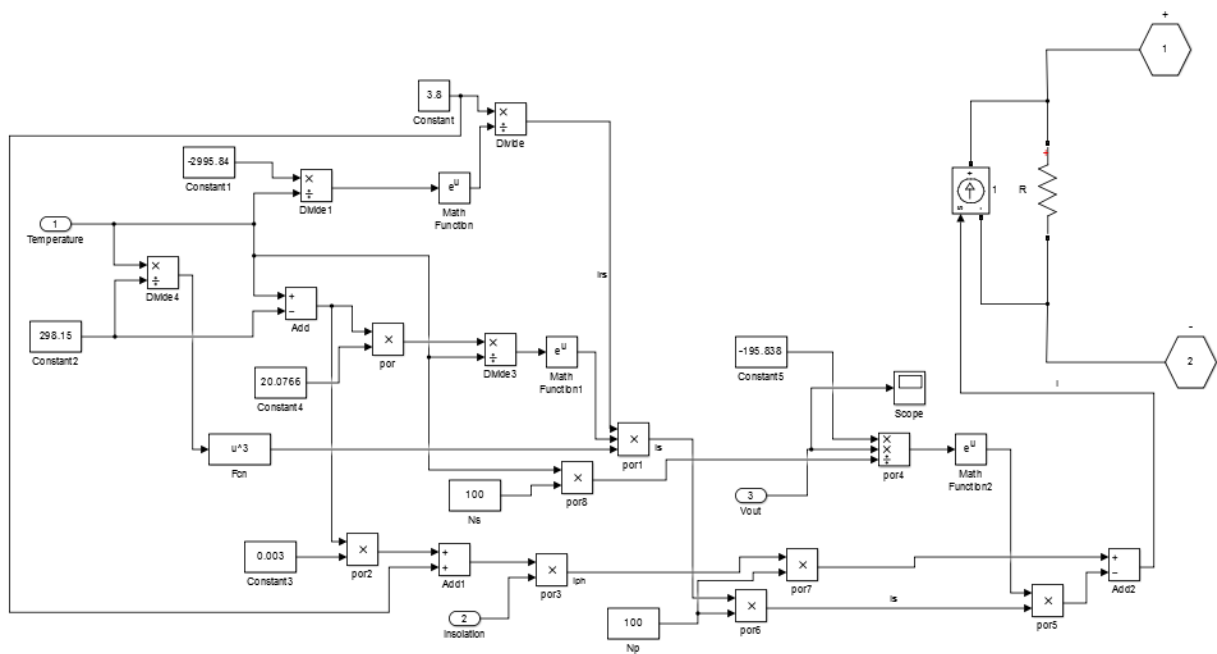


Figura 7.2 Modelo matemático implementado para el panel fotovoltaico

A la salida de los paneles fotovoltaicos se conecta un convertidor Boost el cual está controlado por un controlador PI, este se encarga que en los terminales de salida del Boost siempre se tenga una salida de corriente y voltaje constante sin importar las variaciones de irradiación que se generan dentro del modelo fotovoltaico.

Teniendo los modelos a implementar listos se conectan en paralelo el generador eólico y el parque fotovoltaico, este parque cuenta con 100 paneles conectados en paralelo y 100 paneles conectados en serie.

En el control difuso mamdani es necesario cambiar el voltaje a, b y c a voltaje de eje directo y eje de cuadratura (dq), para efectuar el control en estas dos variables. Luego del control se requiere de nuevo convertir el voltaje de eje directo y eje de cuadratura (dq) en una salida que tenga de nuevo un voltaje trifásico, para generar un ciclo de trabajo en el generador PWM de seis pulsos.

A continuación se invierten los pulsos que ingresan al IGBT, donde se genera la señal de voltaje deseada en la carga.

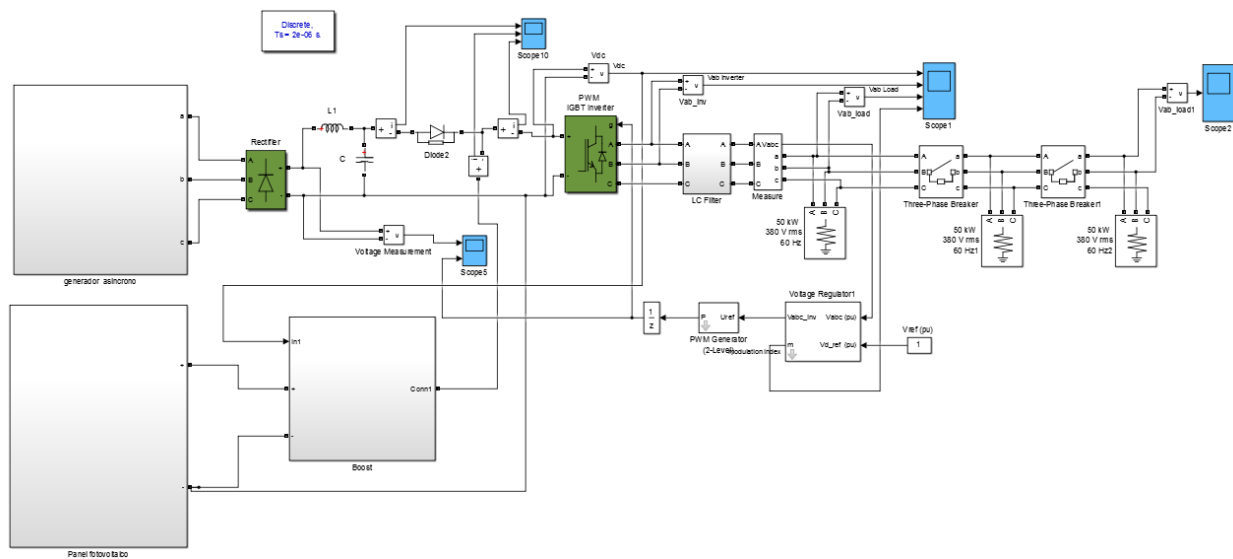


Figura 7.3 Modelo donde se realizaron las pruebas

Con este modelo se realizaron pruebas tales como ir aumentando la carga paulatinamente buscando que llegue a una carga total de 150 kw, luego se iba desconectando esta carga, para así poder observar los cambios en la tensión a medida que se conectada y desconectada la carga de forma aleatoria, probando así la eficiencia del controlador difuso mamdani.

7.2 RESULTADOS

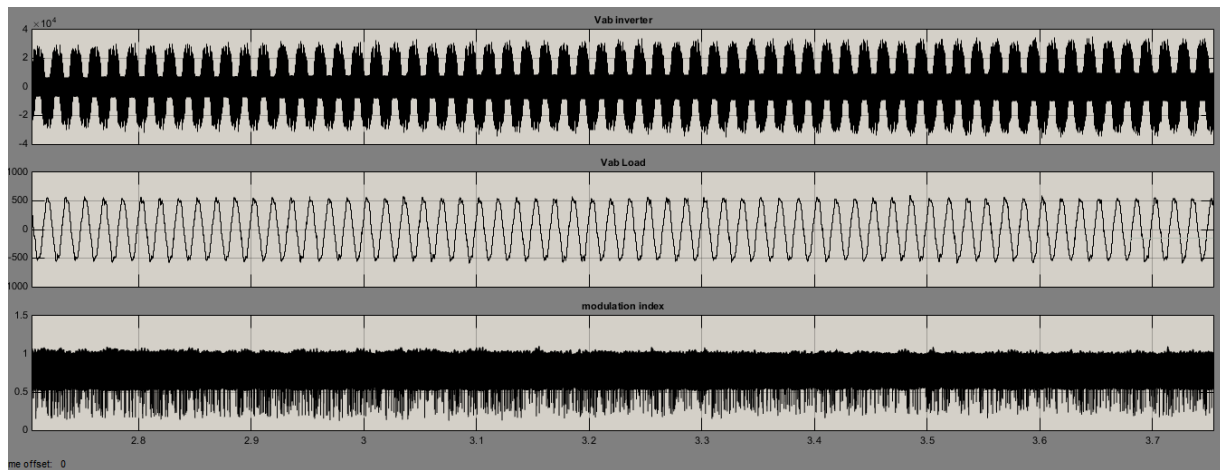


Figura 7.4 Control difuso con carga inicial de 50 KW

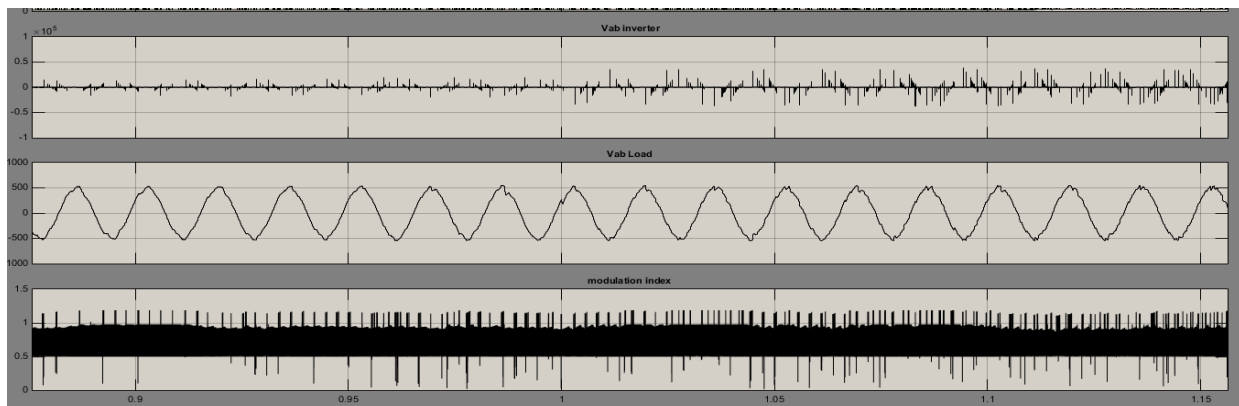


Figura 7.5 Momento en que entra la primera carga de 50 kW con el control difuso

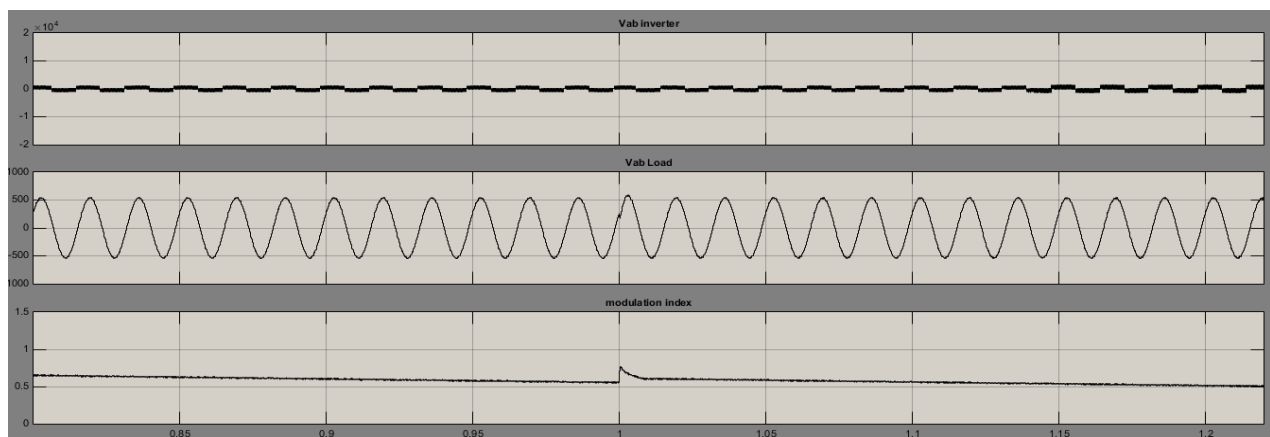


Figura 7.6 Momento en que entra la primera carga de 50 kW con el control PI

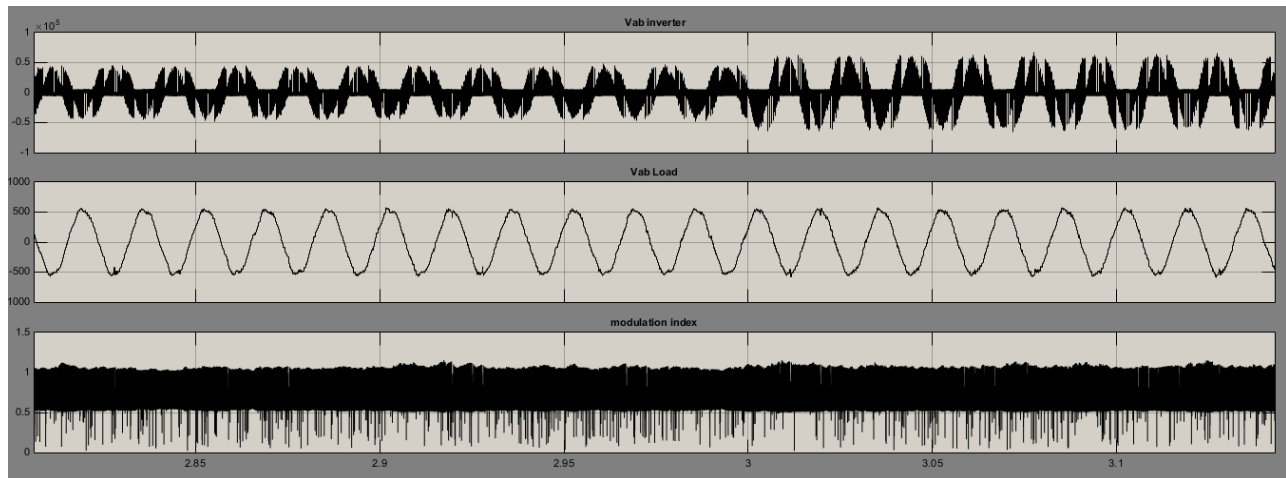


Figura 7.7 Momento en que entra la segunda carga de 50 kW con el control difuso

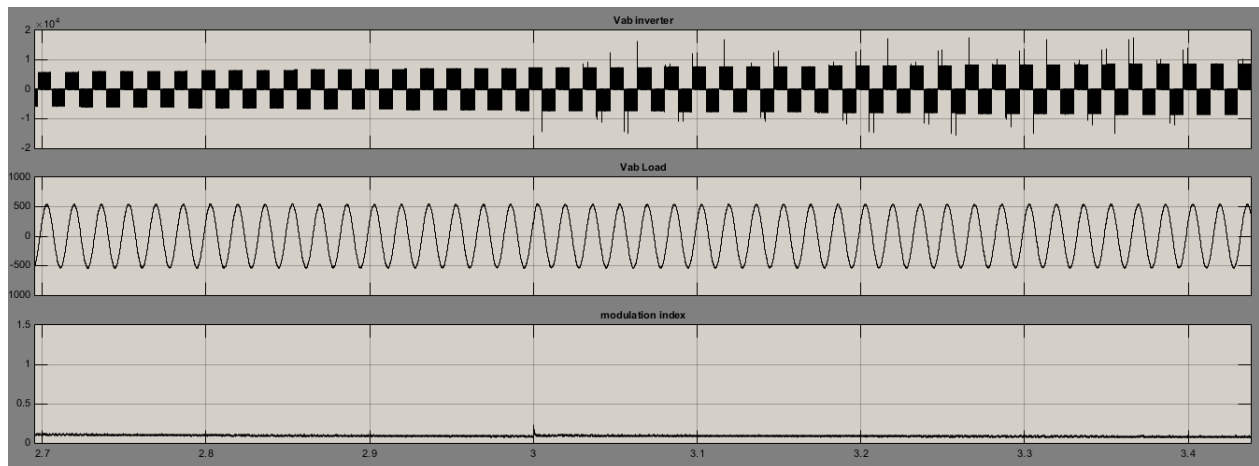


Figura 7.8 Momento en que entra la segunda carga de 50 kW con el control PI

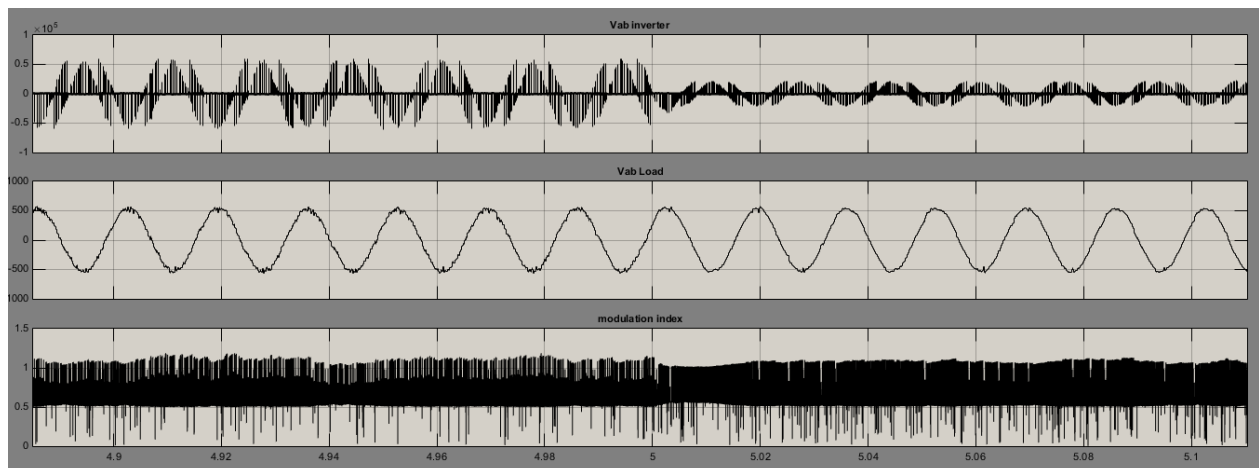


Figura 7.9 Momento en que se desconecta la primera carga de 50 kW con el control difuso.

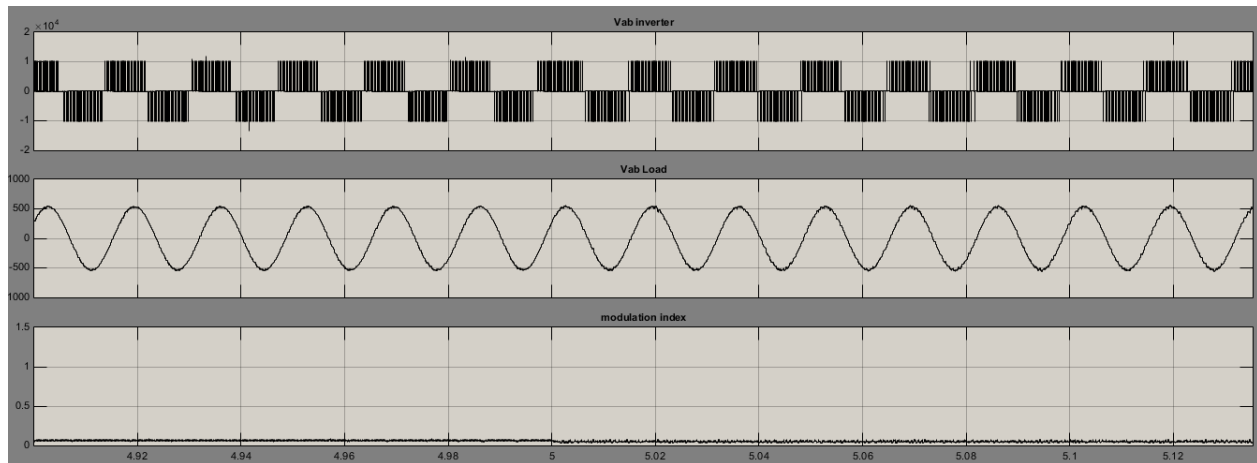


Figura 7.10 Momento en que se desconecta la primera carga de 50 kW con el control PI

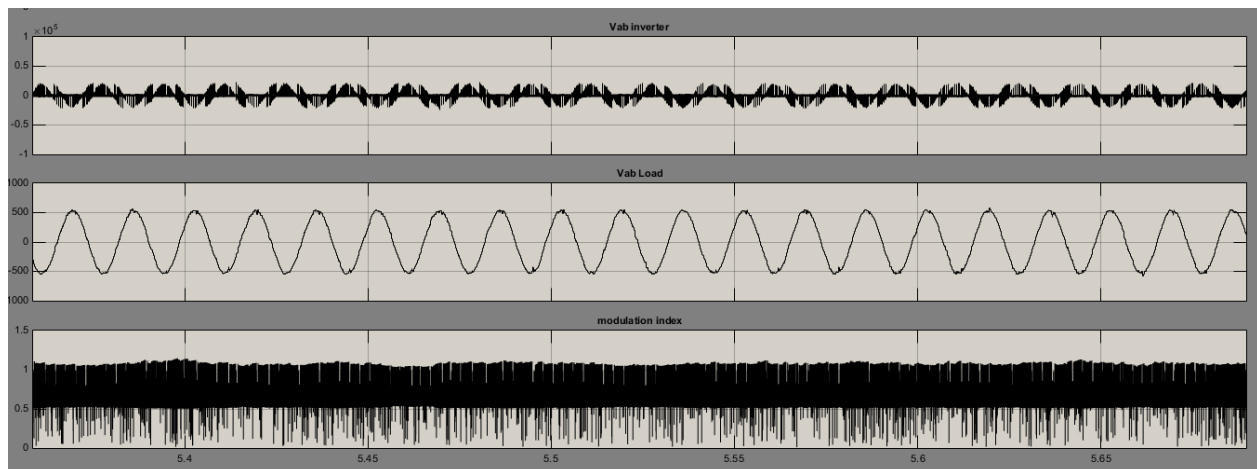


Figura 7.11 Momento en que se desconecta la segunda carga de 50 kW con el control difuso.

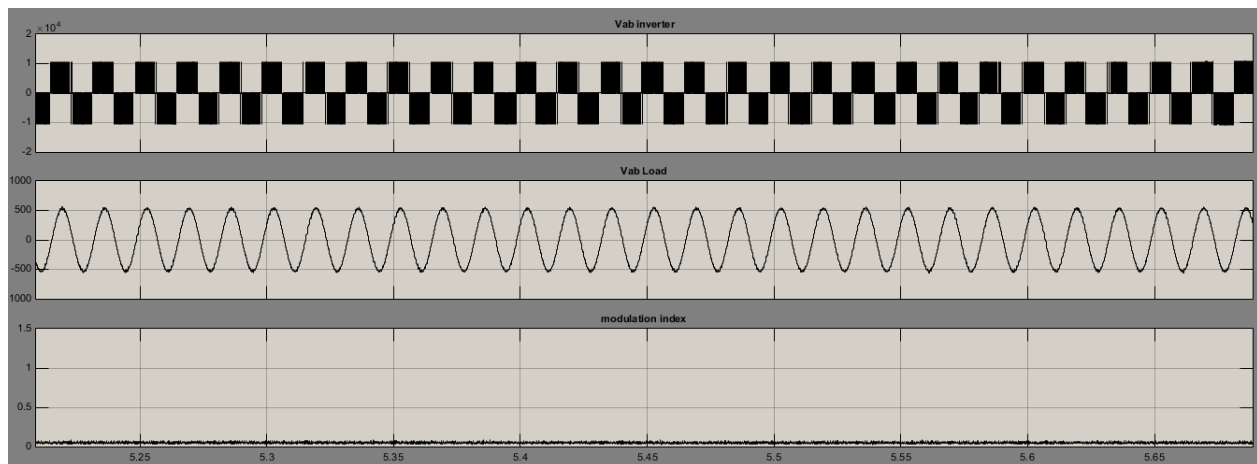


Figura 7.12 Momento en que se desconecta la segunda carga de 50 kW con el control difuso.

En todos los casos se aprecia de forma notoria que sin importar la carga que este en el momento el nivel de tensión se mantiene dentro de un rango permisible, en donde se puede continuar con la inyección de potencia a la carga de forma ininterrumpida, en los momentos que ingresa la carga o se desconecta el nivel de tensión presenta una pequeña perturbación, pero el controlador evita que esta perturbación se mantenga, corrigiéndola un momento después de que ingresa la carga.

Prueba de la eficacia del controlador difuso y el control PI se ve en la señal de inversor, ya que esta cambia para mantener el nivel de tensión, cabe aclarar que esta señal cambia debido al controlador difuso que hace las correcciones necesarias para mantener el sistema en operación.

CAPITULO 8

8.1 CONCLUSIONES

En la implementación del modelo presentado con el cual se realizaron las pruebas, se debe garantizar que la corriente fluya siempre hacia la carga, para dar solución a esta situación se conectaron diodos a la salida de los terminales del generador eólico y en los terminales de los paneles fotovoltaicos, de esta manera se garantiza que no se produzcan corrientes inversas.

En la implementación del modelo, en el momento de conectar el generador eólico y los paneles fotovoltaicos en paralelo se debe garantizar que ambos estén al mismo nivel de tensión, para lo cual se instaló un regulador dc-dc y regulador tipo Boost en el generador eólico y los paneles fotovoltaicos respectivamente.

Un controlador difuso tipo mamdani aplicado a un modelo de generador eólico y panel fotovoltaico funciona ante perturbaciones internas o externas, ya sea en variaciones de los parámetros del generador o en variaciones de la carga, mostrando una adaptación óptima en la respuesta ante estos cambios sobre el sistema.

Un número mayor de reglas permite obtener un mejor seguimiento de la referencia, pero este aumento de reglas hace que consuma mucha memoria en el ordenador además de postergar el tiempo de simulación.

Aunque el controlador difuso mamdani tarda un poco en alcanzar la señal de referencia, una vez la alcanza obtiene una muy buena respuesta ante cualquier tipo de perturbación.

En este trabajo de investigación formativa se centralizo, en el sistema de conexión de la turbina eólica y paneles fotovoltaicos a la red de forma que no se genere variaciones de tensión en el momento de incorporarse al sistema de potencia.

Se verifico el comportamiento y funcionamiento adecuado del convertidor Boost, mediante la herramienta Simulink- Matlab, que permite con relativa facilidad implementar un sistema de control donde se eleva la tensión que sale del inversor de diodos.

En el análisis de este trabajo se encontró que el control PI llega más rápido al voltaje de referencia que el control difuso mamdani, sin embargo, la implementación de este último no

requiere la identificación del sistema, esto es de gran utilidad ya que se puede ahorrar esfuerzo computacional.

8.2 RECOMENDACIONES

En las investigaciones realizadas anteriormente relacionadas con el control de turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos se ha comprobado que el desempeño de esta se ve afectado por la estrategia de control utilizada. Esto motiva a continuar investigando nuevas alternativas de control que mejoren el desempeño de la generación eólica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Stiebler, Wind Energy Systems for Electric Power Generation, GreenEnergy and Technology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pags. 11–14, 2008.
- [2] M. Yin, G. Li, M. Zhou, C. Zhao, Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE.
- [3] N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca, W. Price, R. elmerico, Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 MW Wind Turbine-Generators for Stability Simulations, Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE
- [4] F. Berruti, Modelado y control de turbinas de aerogeneradores de velocidad variable, 8vo Encuentro de especialistas en Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas. 26 y 27 de Noviembre de 2010. Montevideo, Uruguay.
- [5] H. Hasanien, S. Muyeen, Design Optimization of Controller Parameters Used in Variable Speed Wind Energy Conversion System by Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 3, No. 2, Abril, 2012.
- [6] L. Fernández. “Modelos avanzados para la predicción a corto plazo de la producción eléctrica en parques eólicos” Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Rioja, 2007.
- [7] J. Avellaneda. “Estudio del potencial de generación de energía eólica en la zona del páramo de chontales, municipios de Paipa y Sotaquirá. Departamento de Boyacá,” Tesis de Maestría en Ingeniería con énfasis en energías alternativas, universidad libre, 2012.
- [8] A. M. H. Sánchez, “Análisis, modelado y simulación de la operación de sistemas de generación eoloeleétrica basados en generadores de inducción tipo jaula de ardilla,” 2008.
- [9] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas. McGraw-Hill, 1991.

- [10] C. Carrillo, “Análisis y simulación de sistemas eólicos aislados,” PhD, Universidade de Vigo (Spain), 2001.
- [11] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, Power system stability and control. McGraw-hill New York, 1994, vol. 7.
- [12] M. Cañas Carretón, “Nuevas propuestas de resolución de modelos electromecánicos de aerogeneradores: aplicación a problemas de agregación,” 2013.
- [13] R. T. Derazkolaie, H. A. Shayanfar, and B. Mozafari, “Effects of rotor resistance value of scig on its output power and efficiency,” Int. J. Pure Appl. Sci. Technol, vol. 4, no. 1, pp. 41–48, 2011.
- [14] J. G. Slootweg, Wind power: Modelling and impact on power system dynamics. TU Delft, Delft University of Technology, 2003.
- [15] N. Mohan. “Electrónica de Potencia Convertidores, aplicaciones y diseño,” Tercera Edición, pp. 151-156, 2013.
- [16] Alonso A., M.; Chenlo, F. (2005). “Estimación de la energía generada por un Sistema Fotovoltaico conectado a la Red”. Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos CIEMAT. Madrid.
- [17] George Bojadziev, Maria Bojadziev. Fuzzy set,Fuzzy logic, Application USA. World Scientific. Pp. 113-252. 1995
- [18] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich. Fuzzy control. Ohio. Addison-Wesley. Pp. 23-110. 1998